



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas bituminosas discontinuas. Efecto del contenido de betún

Treball realitzat per:

Carles Carbonell Rierola

Dirigit per:

Adriana Martínez Reguero

Grau en:

Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 06/2018

Departamento de Ingeniería civil y ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo Final de Grado (TFG) me ha dado la oportunidad de plasmar sobre papel varios conocimientos que he ido adquiriendo al cabo del Grado de Ingeniería de Obras Públicas, y que ahora se termina en este trabajo. Por esta razón, me gustaría agradecer a todos aquellos profesores que he tenido durante este largo período.

Al centrarnos en el TFG, en primer lugar me gustaría agradecer a mi tutora, la profesora Adriana Martínez Reguero, por su dedicación de horas y horas, consejos y esfuerzo. Siempre ha estado disponible en todo momento que la he necesitado.

A José Amorós y a Jordi, técnicos del Laboratorio de Caminos, sin su ayuda este trabajo no hubiera podido ser realizado. Su orientación y conocimiento en la materia me ha dado entender y hacer este trabajo con mucha más facilidad.

También agradecer a Félix Edmundo Pérez-Jiménez y José Rodrigo Miró i Recasens, ya que también me han ayudado a orientar este trabajo con sus sabios consejos.

Y finalmente y no menos importantes, a mi familia y amigos de la Universidad Politècnica de Catalunya, han sido el pilar fundamental para estar en la situación actual.

RESUMEN

Título: Sensibilidad del ensayo Fénix sobre mezclas discontinuas. Efecto del contenido de betún.

Autor: Carles Carbonell Rierola

Tutora: Adriana Martínez Reguero

En las capas bituminosas la frecuencia de fisuraciones es un problema constante para las carreteras. La fatiga por las cargas causadas por el tráfico y las variaciones de temperaturas frecuentes, en las que las mezclas bituminosas están expuestas al encontrarse en la capa de rodadura (capa de la superficie), es muy notoria. Por lo tanto, para tener un control del deterioro de las capas bituminosas, se hacen una serie de ensayos antes de la puesta en obra. Así pues, el mantenimiento de las carreteras es menor en cuanto se garantiza el control de calidad, ya que no necesitan tanto tratamiento para que estén en buen uso.

En este trabajo de final de grado se ha basado en uno de estos ensayos experimentales. Un ensayo que es relativamente nuevo y que ha sido desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la UPC. Este ensayo se llama Fénix, porque se desarrolló en el marco de un proyecto de investigación que se llamaba Fénix: investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles.

El ensayo Fénix es capaz de caracterizar y explicar los mecanismos de deterioro, a partir de diferentes parámetros que determinan la respuesta de las mezclas bituminosas. De esta forma, permite un estudio exhaustivo de los diferentes pasos que sufre una probeta antes y después de ser fisurada.

A lo largo de esta investigación se va a determinar el grado de sensibilidad que tiene el ensayo al cambiar factores externos como la temperatura, y también, cambiando la composición de la mezcla al variar el contenido de betún.

Para poder apreciar la sensibilidad del ensayo, se va a complementar el estudio con tests estadísticos que van a determinar la repetibilidad entre probetas hechas y ensayadas de la misma forma, y entre grupos fabricados y ensayados de manera distinta. Siempre desestimando las probetas que hayan sido alteradas.

Estudiando y analizando los parámetros registrados por el equipamiento de adquisición del ensayo experimental, se van a evaluar los cambios de composición para cada parámetro y entre parámetros. Para así poder ver el comportamiento de cada grupo y definir los rangos óptimos de contenido de betún.

ABSTRACT

Title: Fenix's test sensitivity on discontinued mixtures. Bitumen's content effect.

Author: Carles Carbonell Rierola

Tutor: Adriana Martínez Reguero

Cracking frequency in bituminous layers is a constant issue for roads. The fatigue due to traffic charges and frequent changes in temperature in which bituminous mixtures are exposed for being in the wearing course (surface layer), are very notorious. Therefore, in order to have a control of bituminous layers' deterioration, a series of tests are carried on before setting up any new road. As a result, roads' maintenance is reduced because they do not need so much treatment to be in a good condition when quality control is ensured.

This Final Degree Project has been based in one of those experimental tests which is relatively new and has been developed by UPC's "Caminos" laboratory. This test is called Fenix, as it was developed in the frame of an investigation project that had the same name: strategic research on more secure and sustainable roads.

Fenix test is able to characterize and explain the distress mechanisms from several parameters that determine bituminous' layers response. Thus, it allows an exhaustive study of the different steps suffered by a test tube before and after being cracked.

Along this investigation, the sensitivity grade of this test will be determined by changing different external factors such as temperature, and also, changing the mixture's composition by varying its bitumen content.

In order to be able to appreciate the test's sensitivity, the study will be completed with statistical tests. These, will determine the repeatability among test tubes that have been done and tested in the same way and among groups that have been done and tested differently; rejecting always those ones that have been damaged.

By studying and analyzing all the registered parameters of the test's equipment, the composition change of each parameter and among all of them will be evaluated. This, will allow us to see the behavior of each group in order to define the optimal ranges of bitumen content.

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	2
---	---

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	5
-----------------------------------	---

2.1 Introducción.....	5
2.2 Definición de mezcla bituminosa	6
2.2.1 Mezclas bituminosas para capas de rodadura	7
2.3 Ámbito de aplicación	8
2.4 Factores que influyen en la aparición de fisuras y sus tipologías	10
2.4.1 Fisuración por fatiga	10
2.4.2 Fisuración por reflexión de juntas	11
2.4.3 Fisuración de borde	11
2.4.4 Fisuración en bloque.....	12
2.4.5 Fisuración longitudinal.....	13
2.4.6 Fisuración transversal.....	13
2.5 Ensayos de tracción	14
2.5.1 Indirect Tensile Test (IDT)	14
2.5.2 Semi-circular bending test (SCB)	16
2.5.3 Disk-shaped compact tension test (DCT)	17
2.5.5 Ensayo Catalunya tracción directa (CTD)	17
2.5.6 Ensayo Barcelona tracción directa (BTD)	18
2.5.7 Ensayo Fénix.....	20
2.6 Sensibilidad del ensayo Fénix	21

Capítulo 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	22
---------------------------------------	----

3.1 Introducción.....	22
3.2 Plan de trabajo	22
3.3 Materiales empleados	23
3.3.1 Árido grueso	23
3.3.2 Árido fino	24
3.3.3 Betún.....	25
3.4 Preparación del material	26

3.5 Fabricación de probetas	29
3.6 Determinación de la densidad y el contenido de huecos.....	32
3.7 Ensayo Fénix.....	36
3.7.1 Introducción y ámbito de aplicación	36
3.7.2 Descripción del ensayo Fénix	36
3.8 Introducción y evaluación de datos.....	43
3.8.1 Test de Grubbs'	44
3.8.2 Descripción estadística	45
3.8.3 Límite de repetibilidad.....	45
3.8.4 Test de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov)	45
3.8.5 Test de varianzas iguales (Levene)	46
3.8.6 ANOVA	47
Capítulo 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	50
4.1 Introducción.....	50
4.2 Resultados y análisis del ensayo densidad máxima para % contenido de huecos	51
4.3 Parámetros de rigidez del ensayo Fénix	53
4.3.2 Resistencia a Tracción (RT).....	55
4.4 Parámetros de deformación del ensayo Fénix.....	58
4.4.2 Desplazamiento del 50% de la carga post-pico (d0,5Pm).....	60
4.5 Relación de Rigidez vs Deformación.....	62
4.5.1 IRT vs Parámetros de deformación	62
4.5.2 GF vs Parámetros de deformación	66
Capítulo 5. CONCLUSIONES	71
5.1 Ensayo de densidades máximas.....	71
5.2 Ensayo Fénix.....	72
Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA.....	73

Anejos:

Anejo 1:

Datos experimentales extraídos del ensayo Fénix (Gráficas).

Datos experimentales extraídos del ensayo Fénix (Tablas resumen).

Anejo 2:

Datos experimentales extraídos del ensayo de densidades.

Anejo 3:

**Tests estadísticos: Test de Grubb's, Test de Kolmogorov-Smirnov, ANOVA
(Test de Tukey o Test de Games-Howell).**

Índice de figuras

Figura 1.1: Capas de un firme.	2
Figura 1.2: Gráfico y muestra de los resultados de los parámetros extraídos del ensayo Fénix ..	4
Figura 2.1: Descripción de la climatología según el territorio español.	9
Figura 2.2: Fisuración por fatiga.	10
Figura 2.3: Fisuración por reflexión de juntas.	11
Figura 2.4: Fisuración de borde.	12
Figura 2.5: Fisuración en bloque.	12
Figura 2.6: Fisuración longitudinal.	13
Figura 2.7: Fisuración transversal.	13
Figura 2.8: Colocación de la probeta en el ensayo Indirect Tensile Test (IDT).	15
Figura 2.9: Gráfico Carga-Deformación del ensayo Indirect Tensile Test (IDT)	15
Figura 2.10: Colocación de la probeta en el ensayo Semi-circular bending test (SCB).	16
Figura 2.11: Simulación de la colocación de una probeta en el ensayo Disk-shaped compact tension test (DCT).	17
Figura 2.12: Ensayo Catalunya tracción directa (CTD).	18
Figura 2.13: Proceso de fabricación de las probetas en el ensayo Catalunya tracción directa (CTD).	19
Figura 2.14: Ensayo BTB en el modo estático y su curva característica (Carga-Desplazamiento).	19
Figura 2.15: Ensayo BTB en el modo dinámico a fatiga por tracción directa.	20
Figura 2.16: Colocación de la probeta en el ensayo Fénix.	20
Figura 2.17: Gráfico Carga-Desplazamiento extraído del equipo de adquisición.	21
Figura 3.1: Árido pórfido	24
Figura 3.2: Árido calizo.	24
Figura 3.3: Tamizadora del Laboratorio del Departamento de Infraestructuras UPC	28
Figura 3.4: Lavado del árido	28
Figura 3.5: Árido de 0,063 mm	28
Figura 3.6: Platas con los husos de cada árido a 800g y su filler correspondiente.	29
Figura 3.7: Limpieza de los moldes	30
Figura 3.8: Paso a paso para la fabricación de las probetas.	31
Figura 3.9: Compactador de impacto Marshall programado a 50 golpes.	31
Figura 3.10: Gato hidráulico	32
Figura 3.11: Pie de rey digital	32
Figura 3.12: Proceso de desgranación	33
Figura 3.13: Bañera de agua destilada a 25 °C	34
Figura 3.14: Pesado de la mezcla con agua destilada dentro del pictómetro	34
Figura 3.15: Gráfico Carga-Desplazamiento.	36
Figura 3.16: Papel de vidrio y disolvente	39
Figura 3.17: Pasta cemento y retardador para adherir las probetas con las placas.	40
Figura 3.18: Probetas pegadas a las placas bien alineadas.	40

Figura 3.19: Nevera programada a 20 °C.	41
Figura 3.20: El antes y después de la prensa del ensayo Fénix.	41
Figura 3.21: Maquinaria del ensayo Fénix.....	42
Figura 3.22: Plancha calefactora.....	43
Figura 4.1: % Contenido de huecos - % Contenido de betún.....	53
Figura 4.2: Índice de rigidez a tracción - % Contenido de betún.....	54
Figura 4.3: Resistencia a tracción - % Contenido de betún.....	56
Figura 4.4: Energía de fractura - % Contenido de betún.....	57
Figura 4.5: Índice de tenacidad - % Contenido de betún.....	59
Figura 4.6: Desplazamiento al 50 % carga post-pico - % Contenido de betún.....	61
Figura 4.7: Índice de rigidez a tracción - Índice de tenacidad.....	63
Figura 4.8: Índice de rigidez a tracción - Índice de tenacidad.....	64
Figura 4.9: Índice de rigidez a tracción - Desplazamiento al 50 % carga post-pico.....	65
Figura 4.10: Índice de rigidez a tracción - Desplazamiento al 50 % de la carga post-pico.....	66
Figura 4.11: Energía de fractura - Índice de tenacidad.....	67
Figura 4.12: Energía de fractura - Índice de tenacidad.....	68
Figura 4.13: Energía de fractura - Desplazamiento al 50 % carga post-pico.....	69
Figura 4.14: Energía de fractura - Desplazamiento al 50 % de la carga post-pico.....	69

Índice de tablas

Tabla 2.1: Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares que fija el tipo, composición y dotación de la mezcla que deberá cumplir lo indicado en la tabla 543.9.	8
Tabla 2.2: Clasificación de los betunes según su categoría de tráfico pesado y su tipo de mezcla.	8
Tabla 2.3: Especificación de los tipos de categorías de tráfico pesado	9
Tabla 2.4: Los valores se han determinado por adaptación de los datos disponibles durante un período de 30 años en las estaciones principales del Instituto Nacional de Meteorología.....	9
Tabla 3.1: Porcentajes de árido para cada tamiz según el tipo de mezcla.....	25
Tabla 3.2: Porcentajes de árido para cada tamiz en este trabajo.....	25
Tabla 3.3: Especificaciones del artículo 212 del PG-3	26
Tabla 3.4: Características del betún.....	26
Tabla 3.5: Granulometría para una mezcla de 800 gamos.....	27
Tabla 3.6: Betún necesario para una probeta de 5 cm.....	30
Tabla 4.1: Resumen de los huecos de la mezcla BBTM 8B 4%	51
Tabla 4.2: Resumen de los huecos de la mezcla BBTM 8B 4,75%.	51
Tabla 4.3: Resumen de los huecos de la mezcla BBTM 8B 5,5%.	52
Tabla 4.4: Resumen de los valores óptimos según los parámetros estudiados.....	70

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las infraestructuras viales son fundamentales para la movilización de los ciudadanos ya que son las principales en dar lugar al concepto de la globalización. Están diseñadas para que conecten el territorio y así, ayuden a optimizar el tiempo de desplazamiento. Por lo tanto, permiten al usuario desplazarse de un lado a otro con poco tiempo dando un aumento tanto económico como de bienestar.

El elemento básico de una infraestructura vial es el firme. Dicho elemento es diseñado para tener una vida útil y que además proporcione comodidad y seguridad al usuario. Está compuesto por diferentes capas (Figura 1.1).



Figura 1.1: Capas de un firme.

- Capa de rodadura: En un pavimento, la capa superior. Contiene los materiales de mayor calidad del pavimento y su función es dotar a la carretera de las mejores propiedades de rodadura y antideslizantes.
- Capa intermedia: Capa que se encuentra debajo de la capa de rodadura y está compuesta por una mezcla bituminosa. Puede no existir cuando el pavimento es inferior a 8 cm. Entre la capa de rodadura y la capa intermedia se aplica un riego de adherencia, formado por una emulsión bituminosa.
- Capa base: Capa del firme situada debajo del pavimento, cuya misión es eminentemente estructural.
- Riego de adherencia: El riego de adherencia es la aplicación de una emulsión bituminosa sobre una capa tratada con ligantes hidrocarbonados o conglomerantes hidráulicos, previa a la colocación sobre esta de cualquier tipo de capa bituminosa que no sea un tratamiento superficial con gravilla, o una lechada bituminosa.

Las diferentes capas del firme, pueden verse afectadas por la intervención del tráfico y por las condiciones climáticas, lo que implica un deterioro que va a requerir la intervención del firme con tareas de mantenimiento.

La capa de rodadura, al ser la capa que se encuentra en la superficie, es la que se ve más afectada por el tráfico y las condiciones climáticas, y por lo tanto, son las más susceptibles para que se de la fisuración.

La fisuración, es el mayor problema que puede tener cualquier firme, ya que provoca incomodidad, inseguridad e inestabilidad. Hay muchos tipos de fisuraciones como se verá a lo largo de este trabajo, pero todas ellas provocan dicha inestabilidad y reducen la vida útil del firme.

Para que las tareas de mantenimiento sean las menores posibles, y por lo tanto reducir costos, se hacen estudios experimentales previos a la puesta en obra, para obtener un mínimo de conocimiento del comportamiento del material. El material más común para la construcción de los firmes, son las mezclas bituminosas, por las características funcionales y estructurales que proporcionan.

En este trabajo, se va a obtener dicho conocimiento del comportamiento del material mediante el ensayo Fénix, un ensayo a tracción que es relativamente nuevo y que se ha desarrollado en el Laboratorio de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC).

Una vez se ensayen todas las probetas con el ensayo Fénix, los resultados obtenidos serán evaluados estadísticamente para así, poder determinar el lado de sensibilidad que tiene este ensayo, para que los estudios posteriores puedan partir de una fiabilidad o no, que se va a establecer en este trabajo.

De este modo, el objetivo principal de este trabajo de final de grado (TFG), determinan la sensibilidad del ensayo Fénix al variar el contenido de betún. Esto, se va a realizar a diferentes

temperaturas, para así ver si el ensayo determina los mismos cambios a una temperatura u otra.

Otro objetivo será evaluar los parámetros proporcionados por el ensayo, para así poder determinar unos rangos óptimos de contenido de betún, siempre teniendo en cuenta al artículo 542 de pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG.3). Y así, verificar que los resultados obtenidos, están o no, cumpliendo con las especificaciones de dicho artículo.

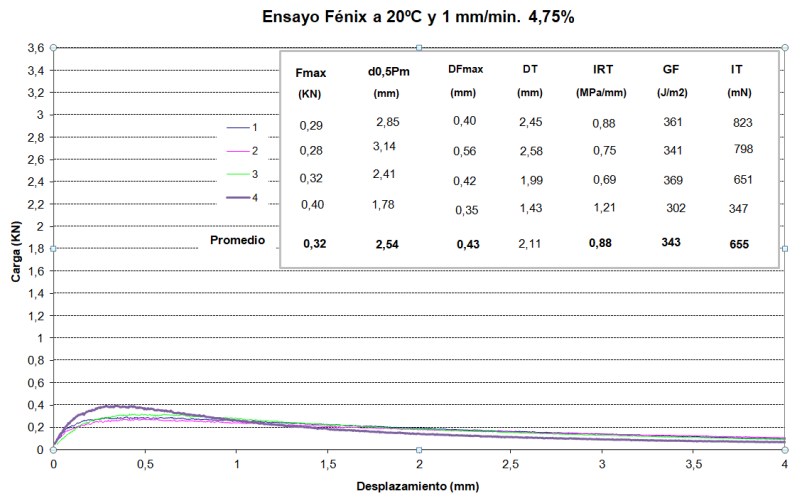


Figura 1.2: Gráfico y muestra de los resultados de los parámetros extraídos del ensayo Fénix

La figura 1.2 es una muestra de cómo se comportan las mezclas bituminosas al realizar el ensayo, de esta forma es como el equipamiento de registro obtiene los diferentes parámetros de rigidez y ductilidad.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este capítulo se va a detallar un estado del arte basado en la lectura de proyectos, artículos, publicaciones, normativas, etc. que hagan referencia a la sensibilidad del ensayo Fénix y a la fisuración de las mezclas bituminosas según contenido de betún y la temperatura.

Este capítulo va a servir para que el lector se ponga en situación para poder tener un buen conocimiento de lo que se va a realizar y estudiar en este trabajo de final de grado. Así pues, este capítulo va a contener temas como los diferentes tipos del betún, ámbito de aplicación, factores que influyen en la aparición de fisura y sus tipologías, diferentes ensayos de tracción que determinan la fisuración y la sensibilidad de los ensayos.

2.2 Definición de mezcla bituminosa

Una mezcla bituminosa es aquella resultante de la combinación de un betún asfáltico, áridos, polvo mineral y, en muchas ocasiones aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante, cuyo proceso de fabricación y puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior a la del ambiente.

Áridos:

Los áridos a emplear en mezclas bituminosas pueden ser de origen natural, artificial o, árido reciclado. En el caso de ser empleados en capa de rodadura, las partículas de los áridos han de tener una elevada resistencia al pulimento, fragmentación y desgaste que pueda ocasionar el tráfico.

Ligante bituminoso:

El ligante bituminoso es el principal componente de la mezcla bituminosa, ya que aglomera los áridos y da cohesión y estabilidad a la mezcla. Los ligantes bituminosos dan flexibilidad y deformabilidad. Hay diferentes tipos de ligantes bituminosos, betunes asfálticos y betunes modificados.

Los betunes asfálticos pueden modificarse mediante la adición de polímeros, caucho, asfaltos naturales, u otro tipo de compuestos, obteniendo betunes con propiedades mejoradas que van a mejorar la cohesión y la tenacidad. De betunes asfálticos con adición de polímeros en España se pueden utilizar:

PMB 10/40-70	PMB 75/130-65
PMB 25/55-65	PMB 45/80-75
PMB 45/80-60 ó 65	

El PMB 45/80-60 ó 65, que es el betún modificado que se va a usar en este TFG. Este tipo de betún tiene una penetración entre 50 y 70 de acuerdo con la norma UNE-EN 1426, y según la norma UNE-EN 1427 su punto de reblandecimiento es mayor o igual que 65. La tenacidad y la recuperación elástica es elevada, que confiere una elevada cohesión a las mezclas abiertas tipo PA (drenante), BBTM A y BBTM B (discontinuas).

{1}

2.2.1 Mezclas bituminosas para capas de rodadura

Al comparar las mezclas drenantes y las mezclas discontinuas se diferencian en que las drenantes son mezclas más porosas que las discontinuas, causando una menor resistencia a los efectos abrasivos del tráfico y pueden colmatarse. En cambio, las mezclas discontinuas ofrecen una excelente macrotextura en capas muy finas de 2-3 cm. Como semejanza, las dos mezclas ofrecen una seguridad y comodidad de rodadura eliminando el hidroplaneo de los vehículos con lluvia o pavimento mojado y para reducir el ruido de rodadura.

Las mezclas para capas de rodadura desempeñan funciones tanto estructurales como funcionales aunque en el diseño de estas capas se prioriza la funcional. Esto lleva al uso de mezclas especiales, que sean porosas y discontinuas tipo BBTM A y BBTM B, de elevada textura y excelente comportamiento en vías rápidas o con presencia de agua.

La designación de las mezclas bituminosas discontinuas parte de una nomenclatura establecida en la norma UNE-EN 13108-2 siguiendo el siguiente esquema:

BBTM	D	Clase	ligante
------	---	-------	---------

Donde:

BBTM: indica que la mezcla bituminosa es de tipo discontinuo. Su traducción en francés es mezcla bituminosa muy delgada.

D: el tamaño máximo del árido, expresado como la abertura del tamiz que deja pasar entre un noventa y un cien por ciento (90% y 100%) del total del árido.

Clase: designación de la clase de mezcla discontinua. A efectos del PG-3 será A o B.

Ligante: tipo de ligante hidrocarbonado utilizado.

Finalmente, en función de la temperatura que se necesita para la fabricación y puesta en obra, las mezclas bituminosas para una capa de rodadura se clasifican en calientes y semicalientes.

Así pues, la mezcla bituminosa que se va a usar en este TFG es una BBTM 8 B PMB 45/80-65.

CARACTERÍSTICA		TIPO DE MEZCLA					
		PA 11	PA 16	BBTM8B	BBTM11B	BBTM8A	BBTM11A
DOTACIÓN MEDIA DE MEZCLA (kg/m ²)		75-90	95-110	35-50	55-70	40-55	65-80
DOTACIÓN MÍNIMA(*) DE LIGANTE (% en masa sobre el total de la mezcla)		4,30		4,75		5,20	
LIGANTE RESIDUAL EN RIEGO DE ADHERENCIA (kg/m ²)	FIRME NUEVO	> 0,30				> 0,25	
	FIRME ANTIGUO	> 0,40				> 0,35	

(*) Incluidas las tolerancias especificadas en el epígrafe 543.9.3.1. Si son necesarias, se tendrán en cuenta las correcciones por peso específico y absorción de los áridos.

Tabla 2.1: Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares que fija el tipo, composición y dotación de la mezcla que deberá cumplir lo indicado en la tabla 543.9.

2.3 Ámbito de aplicación

A la hora de determinar el ligante que se tiene que usar para cierta obra, se tiene en cuenta diferentes factores. En esta tesis se da un tipo de mezcla bituminosa y un betún concreto, por esta razón, en este apartado se va a determinar sus posibles zonas de aplicación.

Según el artículo 211 y 212 de la PG-3 y Reglamentación específica vigente de la DGC:

TIPO DE MEZCLA	CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO				
	T00 y T0	T1	T2 (**) y T31	T32 y ARCENES	T4
DISCONTINUA	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65 PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70	
DRENANTE	PMB 45/80-65	PMB 45/80-65 PMB 45/80-60	PMB 45/80-60 50/70 BC50/70	50/70 70/100 BC50/70	

Tabla 2.2: Clasificación de los betunes según su categoría de tráfico pesado y su tipo de mezcla.

Así pues, para las categorías de tráfico pesado T00, T0 y T1 la mezcla BBTM B con un betún PMB 45/80-65 es la indicada para su uso.

Donde las categorías de tráfico vienen determinadas como:

Categorías de tráfico pesado	IMDp (Vehículos pesados/día)
T00	IMDp > 4000
T0	2000 < IMDp < 4000
T1	800 < IMDp < 2000
T2	200 < IMDp < 800
T3	50 < IMDp < 200
T4	IMDp < 50

Tabla 2.3: Especificación de los tipos de categorías de tráfico pesado

Una mezcla discontinua, tal y como se ha dicho anteriormente, es abierta y por lo tanto se propone para sitios donde la lluvia es casual. Así pues, según el PG-3 los lugares donde hay este tipo de climatología son:

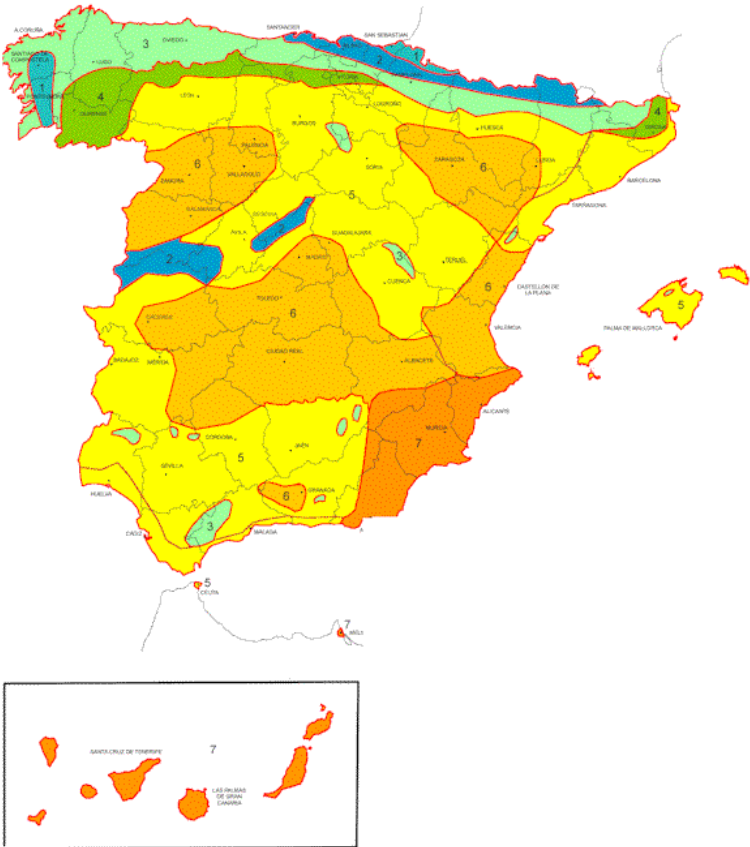


Figura 2.1: Descripción de la climatología según el territorio español.

ZONAS PLUVIOMÉTRICAS	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (mm)	
Lluviosa	Zonas 1 a 4	> 600
Seca	Zonas 5 a 7	< 600

Tabla 2.4: Los valores se han determinado por adaptación de los datos disponibles durante un período de 30 años en las estaciones principales del Instituto Nacional de Meteorología

A partir de lo explicado, las mezclas porosas se usan en las zonas lluviosas, en cambio, las mezclas bituminosas (BBTM) en el resto de España.

Así pues, todos los lugares descritos que tengan carreteras del tipo de T00, T0 o T1, ya que van a necesitar un material que tenga la suficiente resistencia y deformación para aguantar este tipo de carreteras tan solicitadas.

2.4 Factores que influyen en la aparición de fisuras y sus tipologías

La fisuración es una de las causas más comunes en los firmes de carreteras. Normalmente se originan por las cargas que provoca el tráfico, el envejecimiento de los materiales o por el cambio de climatología. Estos factores, dan lugar a pequeñas fisuraciones que posteriormente se propagan obteniendo mayor envergadura.

Por esta razón, en este apartado se va a describir los diferentes factores que provocan las fisuraciones y también los tipos que hay, ya que según como se dan, se manifiestan de manera diferente.

2.4.1 Fisuración por fatiga

Es la fisuración más ocurrente ya que es la que se da a causa del tráfico. El tráfico produce un impacto constante al pavimento, principalmente en la zona de rodadura, en la cual la mezcla bituminosa sufre el efecto de fatiga. Estas cargas reiteradas generan un dibujo al asfalto que se manifiesta con numerosas grietas interconectadas entre sí.



Figura 2.2: Fisuración por fatiga.

Hay dos tipos de mecanismos de fisuración por fatiga:

- **Top-down cracking:** La fisura es iniciada y propagada desde la superficie. Este caso ocurre en pavimentos de espesor mayor a causa de los vehículos pesados con neumáticos con altas presiones de inflado. El envejecimiento de la mezcla bituminosa y el efecto térmico también ayudan a que se dé el Top-down cracking.
- **Bottom-up cracking:** Fisura que se da por las deformaciones y tracciones que sufre el propio firme. La fisura se inicia en la capa base y se propaga hacia la superficie.

2.4.2 Fisuración por reflexión de juntas

La fisuración por reflexión de juntas se produce en las capas bituminosas que refuerzan un pavimento de hormigón, coincidiendo con las juntas y grietas de éste. La fisuración se da cuando el pavimento de hormigón trabaja o se mueve en la capa inferior o cuando se utilizan mezclas bituminosas en estructuras de pavimentos bituminosos antiguos con fisuras existentes. Cuando sucede una de las dos alternativas, la fisuración por reflexión de juntas se manifiesta en la superficie.



Figura 2.3: Fisuración por reflexión de juntas.

2.4.3 Fisuración de borde

La fisuración de borde se encuentra en los extremos laterales de la calzada. Normalmente a una distancia no superior a 0,6 m del borde. Este tipo de fisuración se

caracteriza por presentar grietas en forma de media luna. Este hecho sucede cuando los bordes de las capas bituminosas del pavimento no cuentan con arcenes pavimentados ya que hay falta de compactación y confinamiento. La falta de drenaje y la infiltración de humedad también son factores que influyen en este tipo de fisuración, por lo tanto, es un tipo de fisuración que se da en sitios donde la lluvia es abundante o lugares donde el mar está próximo.



Figura 2.4: Fisuración de borde.

2.4.4 Fisuración en bloque

La fisuración en bloque es causada por las tensiones generadas por la climatología, es decir, por el cambio de temperatura. Se produce especialmente en mezclas bituminosas con módulos de rigidez muy altos, ya que sufren retracciones. También se producen por la falta de espesor o la fatiga causada por el tráfico a las capas superiores del firme.

La manera en que se manifiestan este tipo de fisuración es mostrando unas grietas rectangulares.

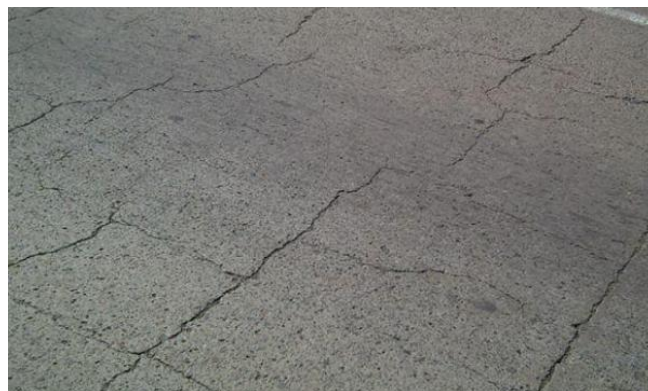


Figura 2.5: Fisuración en bloque.

2.4.5 Fisuración longitudinal

El recorrido de la fisuración longitudinal sigue el eje del camino. Este fallo se produce a causa de una mala ejecución de la junta de construcción longitudinal en el extendido de la mezcla bituminosa.

Cuando la grieta se localiza en el centro de la calzada es a causa de la fatiga que sufre el pavimento por el tráfico, ya que las capas inferiores, las capas de base y subbase granular no resisten el peso, es decir, por fatiga estática. Cuando se localizan en posiciones más laterales, se le atribuye a contracciones térmicas, es decir, se producen por las grandes variaciones de la temperatura.



Figura 2.6: Fisuración longitudinal.

2.4.6 Fisuración transversal

Fisuraciones que se manifiestan perpendicularmente al eje de la vía. La principal causa que se le atribuye es por el deterioro por el efecto térmico en los pavimentos flexibles con mezclas bituminosas de alta rigidez, donde se generan tracciones en la superficie dando lugar a este tipo de fisuraciones. También se le puede atribuir a la mala ejecución o por la reflexión de las fisuras existentes en las capas inferiores del pavimento, normalmente tratadas con cemento. {12}

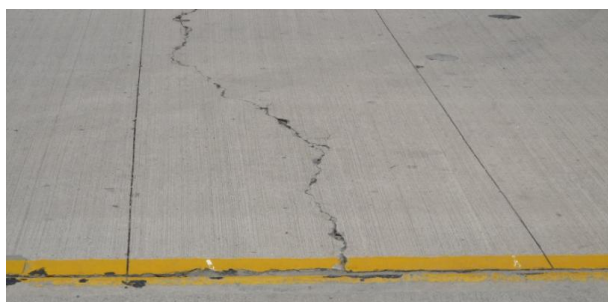


Figura 2.7: Fisuración transversal.

2.5 Ensayos de tracción

En el mundo de la ingeniería es muy importante tener en cuenta la fisuración de los materiales que se tratan, ya que ésta produce muchos problemas a la hora del buen uso de cualquier infraestructura o estructura, ya sea por el deterioro o por el derrumbamiento a casos mayores. Así pues, hacer un buen estudio del concepto de fisuración previene males mayores que podrían causar la muerte del usuario en el caso que hubiera un terremoto.

Para que no suceda la fisuración de un material, y por lo tanto no obtener dichos males mayores, se va a tener que realizar un mantenimiento, éste muchas veces cuesta gran cantidad de dinero, hecho que no conviene a las instituciones o promotores de las infraestructuras o edificios.

Por esta razón, hacer un estudio previo de la fisuración va a permitir tener mayor control del comportamiento del material y es la ingeniería la que proporciona éste conocimiento a partir de diferentes ensayos.

Hay ensayos que hace años que se realizan, otros que se están realizando para aumentar el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con su resistencia y capacidad de deformación. A su vez, permiten determinar parámetros como la deformación de rotura, el módulo de rigidez, la carga máxima o la energía disipada en el proceso de fisuración; parámetros que están directamente relacionados con las mezclas bituminosas entre otras.

Así pues, en este apartado se va a describir los diferentes ensayos que permiten obtener estos parámetros y así, tener el conocimiento necesario.

2.5.1 Indirect Tensile Test (IDT)

El ensayo de tracción indirecta es uno de los más usados por su simplicidad a la hora de usarlo. Es un ensayo que consiste en deformar por compresión diametral, a una probeta cilíndrica que se sitúa horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados a la probeta sean sobre dos generatrices opuestas.

Este ensayo trata sobre la imposición de una carga conocida, que puede ser simple o repetida, y desarrolla una tensión de tracción uniforme normal a la dirección de dicha carga a lo largo del plano vertical. Finalmente, la probeta sufre un fallo por fractura a lo largo del diámetro vertical. {2}

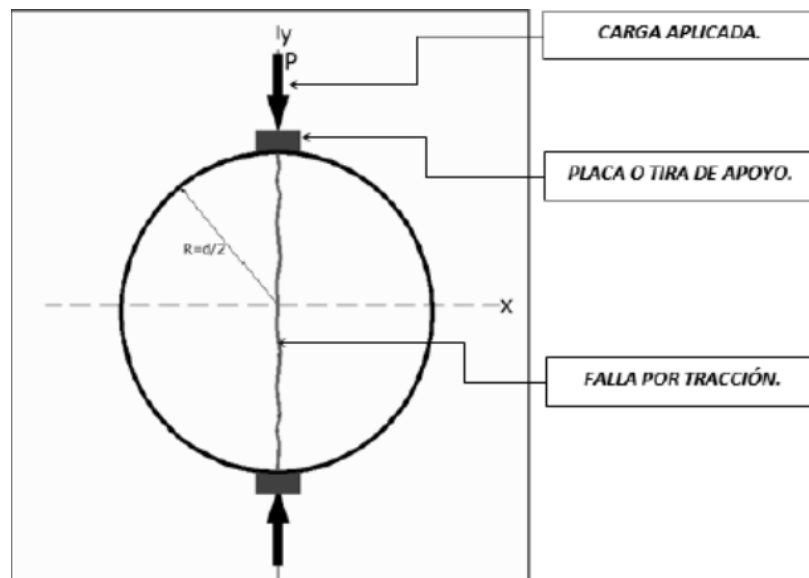


Figura 2.9: Colocación de la probeta en el ensayo Indirect Tensile Test (IDT).

Este ensayo se usa para medir la carga de rotura de la probeta, el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta durante el tiempo que dura el ensayo. De esta manera, el programa informático vinculado al ensayo reproduce una curva similar a la de la figura siguiente.

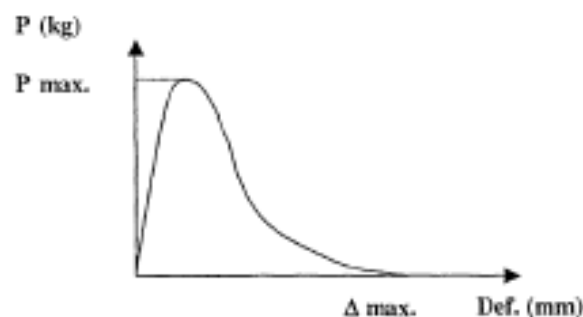


Figura 2.10: Gráfico Carga-Deformación del ensayo Indirect Tensile Test (IDT)

Según Thomas Kennedy, las razones básicas por el que este ensayo es eficaz, es porque la rotura no está seriamente afectada por las condiciones de superficie, que la rotura se inicia en una región relativamente uniforme de tensiones de tracción, el coeficiente de variación de los resultados de ensayo es bajo comparado a otros métodos y el ensayo puede usarse bajo carga estática y carga repartida.

Por lo contrario, este ensayo no es perfecto, ya que la deformación permanente bajo las cargas es indeseable para la evaluación del potencial de fisuración de las mezclas asfálticas y la distribución de la deformación en el método de probetas no es bastante uniforme. {3}

2.5.2 Semi-circular bending test (SCB)

El ensayo Semi-circular bending test mide propiedades de fractura en las mezclas bituminosas. Este ensayo fue desarrollado en la Universidad de Delft, tiene una fácil aplicación y es económico. La principal ventaja respecto a los otros ensayos, es que se ensaya con media probeta, así que simplifica mucho el proceso de la fabricación ya que con una probeta puedes hacer dos ensayos.



Figura 2.11: Colocación de la probeta en el ensayo Semi-circular bending test (SCB).

Este ensayo permite la utilización de testigos y/o probetas, que se seccionan por la mitad y se cortan dando lugar una brecha en el centro.

Se somete la mitad de la probeta al ensayo, apoyada en dos cilindros metálicos a los laterales y luego se le aplica una carga al centro con una velocidad de desplazamiento de 0,5 mm/min. En el ensayo se registra la carga y la deflexión (desplazamiento del pistón). Los resultados de energía de fractura se calculan mediante el trabajo disipado en el proceso de fractura obtenido de la curva carga-desplazamiento.

La desventaja del ensayo SCB es que se produce un complejo estado tensional que afecta al proceso de propagación de la fisura debido a los altos esfuerzos de compresión producidos a causa del lugar de aplicación de la carga, generando un efecto de arco con altos esfuerzos de compresión. {4}

2.5.3 Disk-shaped compact tension test (DCT)

El ensayo Disk-shaped compact tension test fue desarrollado en la Universidad de Illinois. Es un ensayo que sirve para la obtención de la energía de fractura de las mezclas asfálticas sobre probetas o testigos cilíndricos a los que se les practica un corte, quedando un par de orificios.

Para la sección de la geometría cilíndrica se usa la norma ASTM E399, que describe la geometría utilizada para obtener el plano de fractura en probetas metálicas.

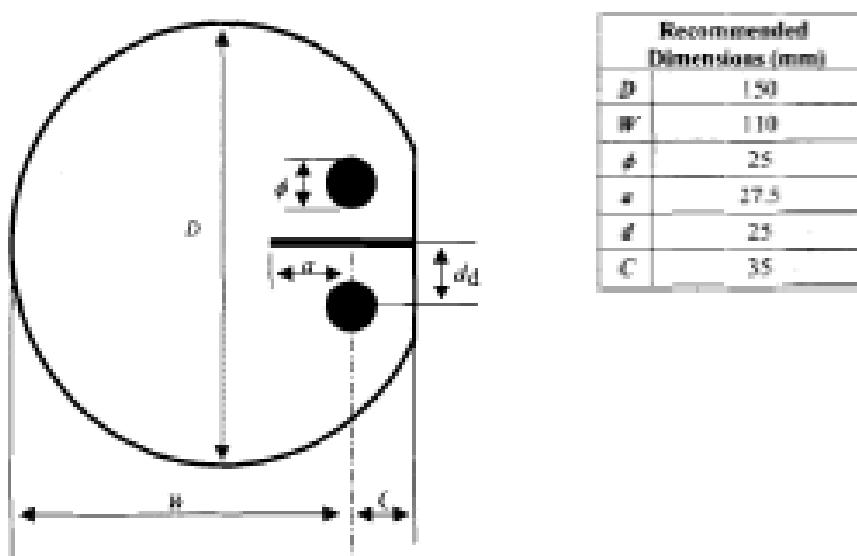


Figura 2.12: Simulación de la colocación de una probeta en el ensayo Disk-shaped compact tension test (DCT).

Las ventajas que presenta este ensayo son el tamaño del área de fractura y su aplicación a testigos. Por lo contrario, el proceso de fabricación de las probetas es que la creación de los agujeros es un proceso dificultoso que requiere una máquina independiente al ensayo. {5}

2.5.5 Ensayo Catalunya tracción directa (CTD)

El ensayo Catalunya tracción directa es un ensayo a tracción que se aplica a probetas prismáticas y permite mejorar el diseño de las mezclas bituminosas. Determina parámetros como la tenacidad y la deformación de rotura. Las muestras pueden ser o bien extraídas in-situ o fabricadas en el laboratorio.

La metodología del ensayo CTD consiste en poner las probetas prismáticas en un ensayo de tracción directa a cualquier temperatura si se dispone de una cámara capaz de controlar la temperatura con gran precisión. Las probetas están sujetas por cada extremo y llevan unos extensómetros situados a ambos lados por su parte central, que se ha realizado un pequeño corte para que se produzca la rotura. El ensayo se efectúa mediante el desplazamiento del pistón, aplicando un desplazamiento a una velocidad constante de 0,1 mm/min hasta que llega a rotura, considerando el ensayo como estático. Finalmente, el sistema de adquisición de datos registra la carga aplicada y la deformación. {6}

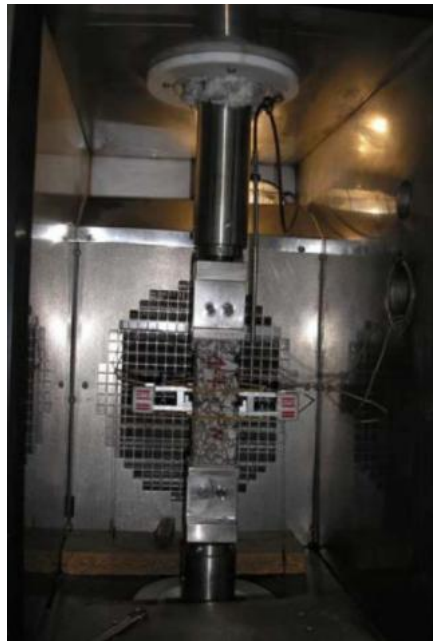


Figura 2.15: Ensayo Catalunya tracción directa (CTD).

2.5.6 Ensayo Barcelona tracción directa (BTD)

Este ensayo permite conseguir la resistencia a la fisuración, la tenacidad y el comportamiento de la mezcla durante su rotura.

Para poder realizar el ensayo se sigue un procedimiento específico a la hora de fabricar las probetas. El uso de la compactadora Marshall es esencial, ésta dispone de un resalto en la parte central, donde la mezcla se verá debilitada creando un plano de fisuración.

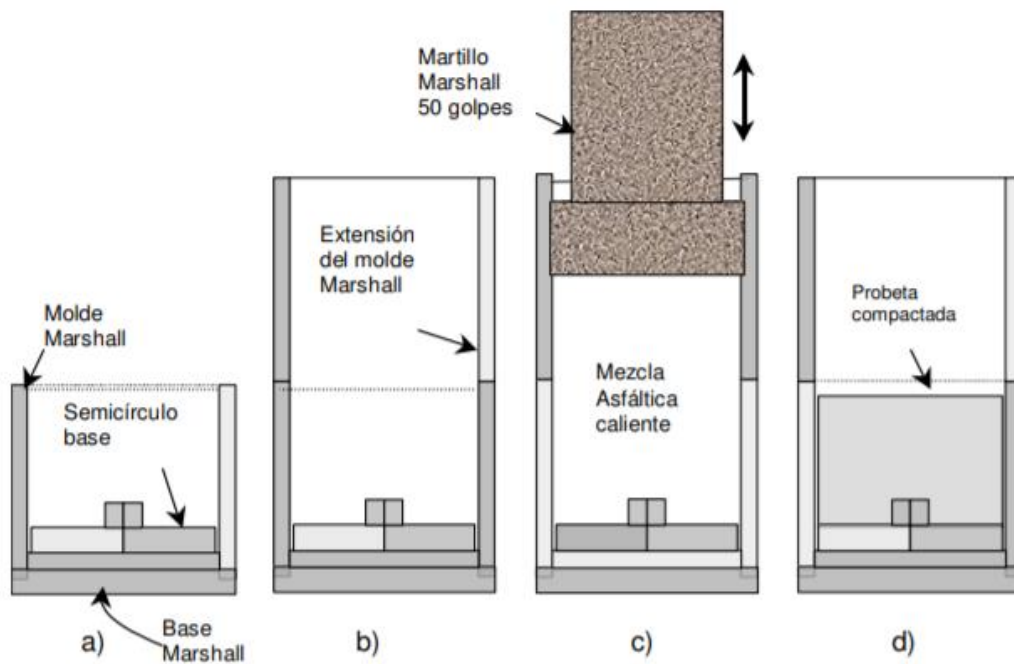


Figura 2.18: Proceso de fabricación de las probetas en el ensayo Barcelona tracción directa (BTD).

Este ensayo es de fácil ejecución aunque no se puede clasificar como ensayo de tracción puro, ya que al impacto de la probeta en la entalladura provoca esfuerzos a compresión, hecho que genera una cierta dificultad a la hora de calcular los parámetros mecánicos.

Se presentan dos modos de ensayo, el estático y el dinámico. El primero se usa para determinar la energía y deformación de rotura de la mezcla a partir de una velocidad de deformación fija. El segundo caso, se aplica una carga senoidal de amplitud y frecuencia constante para poder determinar el comportamiento de fatiga. {7}

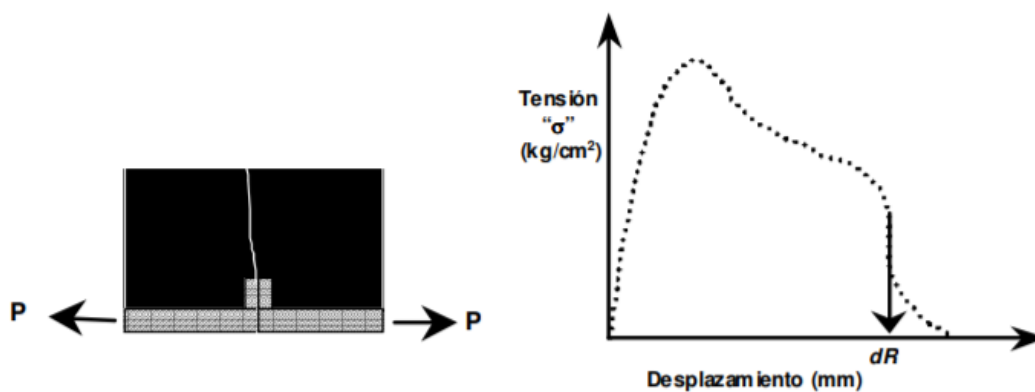


Figura 2.19: Ensayo BTD en el modo estático y su curva característica (Carga-Desplazamiento).

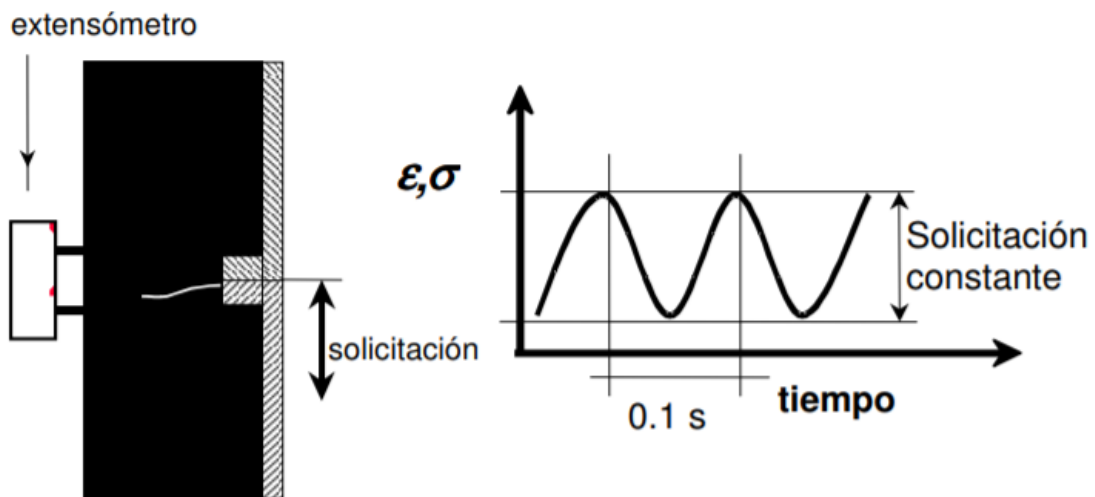


Figura 2.20: Ensayo BTD en el modo dinámico a fatiga por tracción directa.

2.5.7 Ensayo Fénix

El ensayo Fénix es el ensayo que se pretende estudiar en este TFG. Es un ensayo a tracción que se aplica en probetas semicilíndricas que tienen una ranura en el centro para inducir la fisuración.

Una vez cortadas las probetas cilíndricas, se pegan sobre unas placas de acero con un cemento específico detallado en el capítulo 3, dejando una distancia de 5 mm entre ellas. Seguidamente, se depositan en la prensa con unos pasadores en ambos extremos, (figura 2.16) de manera que quede la probeta en posición vertical.



Figura 2.21: Colocación de la probeta en el ensayo Fénix.

Ya con una temperatura predeterminada, se empieza el ensayo, dónde las placas son traccionadas en sentido vertical a una velocidad constante de 1 mm/min. Así pues, el sistema de adquisición empieza a recoger los datos de carga y desplazamiento.

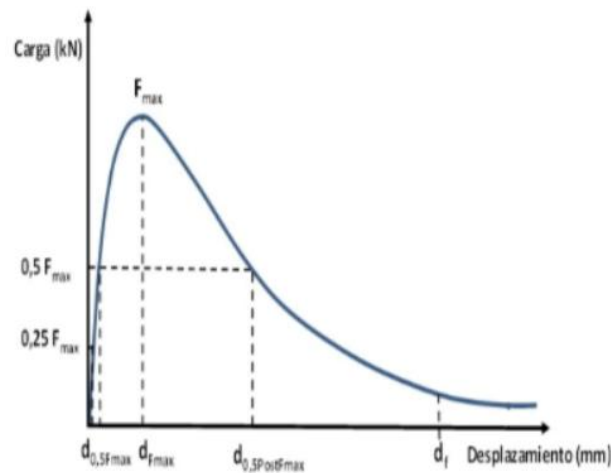


Figura 2.22: Gráfico Carga-Desplazamiento extraído del equipo de adquisición.

Hay también ciertos parámetros que son calculados por este tipo de ensayo, y que se describen en el capítulo 3. {8}

2.6 Sensibilidad del ensayo Fénix

La sensibilidad es la capacidad para percibir variaciones en el resultado al variar un parámetro o parámetros. En esta tesis, los parámetros que se varían son el contenido de ligante de las mezclas bituminosas BBTM y la temperatura a la cual se va a aplicar el ensayo.

Para medir esta sensibilidad en el ensayo Fénix se calcula el coeficiente de variación (C_v), la repetibilidad y diferentes tests estadísticos que van a determinar el grado de significación de los grupos de probetas con discrepancia en algún parámetro. Un ejemplo es el análisis de varianzas, el ANOVA (todos los conceptos descritos en el capítulo 3).

De este modo, se puede evaluar si el ensayo Fénix tiene la suficiente sensibilidad para apreciar las variables propuestas y por lo tanto, poder obtener un criterio de valoración fiable para el estudio de las mezclas asfálticas.

Capítulo 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

En este capítulo se describe el plan de trabajo de esta tesis. Así pues, se detalla cómo se realiza la preparación del material, el proceso de la fabricación, el ensayo de la densidad máxima y el ensayo de Fénix. Este procedimiento se ha realizado en el Laboratorio de Caminos del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y del Territorio de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

3.2 Plan de trabajo

El plan de trabajo sobre la determinación del efecto del contenido de betún en la sensibilidad del ensayo Fénix sobre una mezcla discontinua, se hace con la fabricación de una muestra de 48 probetas distribuidas en series de 16 que difieren en el % de betún (4%, 4,75% y 5,5%). Y se elabora un tanteo para saber el peso aproximado que debe de tener la probeta para obtener una altura de 5 cm.

Una vez fabricadas, se hace el ensayo de densidad máxima para encontrar el % de huecos y se realiza el ensayo Fénix por mitades, es decir 96 mitades de probetas, que se ensayarán a diferentes temperaturas (5 y 20°C).

Así pues, son 3 las series con características distintas:

- 16 probetas: 4% de betún, a 5 y 20°C.
- 16 probetas: 4,75% de betún, a 5 y 20°C.
- 16 probetas: 5,5% de betún, a 5 y 20°C

El número de probetas se definió anteriormente por el profesorado del Departamento de Infraestructuras pensando en que la muestra fuera suficientemente representativa y si por algún factor se tenía que eliminar una por rotura o deterioro en el proceso de fabricación, el ensayo siguiera siendo fiable.

3.3 Materiales empleados

Los materiales empleados para la fabricación de una mezcla bituminosa discontinua BBTM8B están estrictamente estipulados por el PG-3, artículo 543.

Este tipo de mezclas se caracterizan por estar formadas por una fase sólida y otra viscosa. La fase sólida está compuesta de áridos y filler, mientras que la fase viscosa la compone una mezcla de líquidos orgánicos altamente viscosos formados principalmente de hidrocarburos aromáticos policíclicos. Esta combinación se la llama betún.

Así pues, los materiales que se usan para este tipo de mezcla discontinua son:

- Árido grueso: pórfido
- Árido fino: calizo
- Filler: carbonato cálcico
- Betún: PMB 45/80-65

Según el PG-3 artículo 543, hay un método para diferenciar un grano grueso a un grano fino. Para este tipo de mezclas es el tamiz 2 mm el que define uno u otro.

3.3.1 Árido grueso

El árido grueso que se usa es el pórfido, un tipo de roca filoniana. Es una roca formada a partir de la solidificación del magma, es decir, ha sufrido temperaturas muy elevadas. Su enfriamiento da lugar a la formación de cristales de cuarzo y feldespato entre otros,

mostrando un contenido abundante del elemento silicio. Este árido que se ha usado, proviene de la cantera FOJ situada en el municipio de Vallirana (Barcelona).



Figura 3.1: Árido pórfido

3.3.2 Árido fino

El árido fino en este ensayo, está compuesto por árido calizo y proviene de la roca caliza, un tipo de roca sedimentaria muy común en España. Son los áridos que presentan menos problemas a la hora de mezclarlos con los ligantes hidrocarbonados, es decir, dan una mejora a la adhesividad en mezclas bituminosas. Este tipo de árido, también proviene de la cantera FOJ.



Figura 3.2: Árido calizo

La elección del tipo de árido tiene que ver con la función que desempeña la capa, por un lado, y la afinidad árido-betún, por otro. El árido grueso es resistente al pulimento y el árido fino calizo es hidrófobo, es decir, es un material repelente al agua. {11}

Estos dos grupos de áridos van a seguir los porcentajes especificados en la tabla 543.8- Husos granulométricos de la normativa UNE-EN 933-2.

TIPO DE MEZCLA (**)	ABERTURA DE LOS TAMICES. NORMA UNE-EN 933-2 (mm)								
	22	16	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
BBTM 8B (*)			100	90-100	42-62	17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 11B (*)		100	90-100	60-80		17-27	15-25	8-16	4-6
BBTM 8A (*)			100	90-100	50-70	28-38	25-35	12-22	7-9
BBTM 11A (*)		100	90-100	62-82		28-38	25-35	12-22	7-9
PA 16	100	90-100		40-60		13-27	10-17	5-12	3-6
PA 11		100	90-100	50-70		13-27	10-17	5-12	3-6

(*) La fracción del árido que pasa por el tamiz 4 mm y es retenida por el tamiz 2 mm (norma UNE-EN 933-2), será inferior al ocho por ciento (8%).

(**) Se ha omitido en la denominación de la mezcla la indicación del tipo de ligante por no ser relevante a efectos de esta tabla.

Tabla 3.1: Porcentajes de árido para cada tamiz según el tipo de mezcla.

Y por lo tanto, en este plan de trabajo para realizar un ensayo Fénix, va a seguir la siguiente granulometría:

TAMIZ (mm)	11,2	8	5,6	4	2	0,5	0,063
Pasa (%)	100	95	52	22	20	12	5

Tabla 3.2: Porcentajes de árido para cada tamiz en este trabajo.

3.3.3 Betún

El betún empleado para este ensayo es el PMB 45/80-65. Es un betún asfáltico modificado con polímero obtenido por reacción química entre el ligante base y polímeros especialmente formulados para permitir la fabricación y puesta en obra de mezclas asfálticas y que debe de cumplir con las especificaciones recogidas en el artículo 212 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) y las recogidas en la norma UNE EN 14023.

Características	Unidad	Norma	Min.	Máx.
Betún Original				
Penetración /25°C; 100g; 5s)	0,1 mm	EN 1426	45	80
Punto de reblandecimiento	°C	EN 1427	65	
Punto de fragilidad Fraass	°C	EN 12593		-15
Estabilidad al almacenamiento:		EN 13399		
Diferencia Punto reblandecimiento		EN 1427		5
Diferencia penetración (25°C)		EN 1426		9
Recuperación elástica a 25°C		EN 13398	70	
Punto de inflamación		EN 2592	235	
Fuerza Ductilidad (5°C)		EN 13589 EN 13703	3	
Residuo después de película fina y rotatoria				
Variación de masa		EN 12607-1		1
Penetración (25°C; 100g; 5s)		EN 1426	60	
Incremento punto de reblandecimiento		EN 1427		10
Disminución punto de reblandecimiento	°C	EN 1427		5

Tabla 3.3: Especificaciones del artículo 212 del PG-3

Características	Valor
Betún empleado:	
Penetración/ 25°C; 100g; 5s	57
Punto de reblandecimiento	65,3
Punto de fragilidad Fraass	-15
Estabilidad al almacenamiento:	
Punto de inflamación	290
Residuo despues de película fina y rotatoria:	
Variación e masa	0,29
Penetración (25°C; 100g; 5s)	64
Incremento punto de reblandecimiento	10

Tabla 3.4: Características del betún

3.4 Preparación del material

Al hacer la preparación del material se tiene que tener en cuenta la cantidad que se va a usar de cada granulometría de árido para poder realizar la fabricación de probetas.

Así pues, se empieza haciendo un tanteo para asegurar que la altura en este caso sea de 5 cm.

Se determina los pesos que se estima que una vez fabricada una probeta va a tener una altura de 5 cm. Con conocimiento previo de los técnicos del Laboratorio de la Universidad Politécnica de Catalunya, en este ensayo se escogió de 600g a 1000g.

Después de la fabricación de una probeta con cada peso, la probeta que se aproxima más a 5 cm de altura es la de 800g. A partir de aquí, empieza todo el procedimiento de preparación de una serie.

➤ **Paso 1:** Calcular el peso para cada granulometría:

En primer lugar, se calculan los husos de cada granulometría a partir de los %. Este cálculo permite el conocimiento de la cantidad de cada granulometría de árido.

800g	% Pasa	% Retendio	Peso retenido (g)	Peso acumulado (g)
11,2	100			
8	95	5	40	40
5,6	52	43	344	384
4	22	30	240	624
2	20	2	16	640
0,5	1	8	64	704
0,063	5	7	56	760
Filler		5	40	800

Tabla 3.5: Granulometría para una mezcla de 800 gamos.

➤ **Paso 2:** Tamizar los áridos gruesos y finos

El segundo paso se lleva a cabo con una tamizadora vibratoria dónde se colocan los tamices de los cuáles se quiere la muestra: 11.2, 8, 5.6, 4 grano grueso y 2, 0.5 del grano fino. Se inicia la máquina tamizadora durante aproximadamente 1 minuto para que la muestra se asiente en el tamiz correspondiente



Figura 3.3: Tamizadora del Laboratorio del Departamento de Infraestructuras UPC.

➤ **Paso 3:** Tamizar los áridos de granulometría 0,063 mm.

A causa del pequeño tamaño de esta granulometría, no se puede usar la tamizadora ya que ésta funciona por vibración, y toda la muestra se dispersaría. Así que el tamizado de esta fracción se hace mediante un lavado de árido.

Tal y como se puede apreciar en la fotografía, se limpia el árido para quitar el filler que hay en él. Así pues, se consigue la muestra de 0,063 mm.



Figura 3.4: Lavado del árido.



Figura 3.5: Árido de 0,063 mm.

➤ **Paso 4: Pesar áridos**

El último paso para poder terminar la preparación del árido y empezar a fabricar es el de pesar los áridos en unas placas de metal y pesar el filler.

Para hacer este paso es necesario el paso 1, en concreto la última columna de la tabla 3.5, el peso acumulado, ya que la báscula se tara y después se va poniendo el árido con la granulometría correspondiente. Quedando 17 placas y 17 vasos para cada serie.



Figura 3.6: Platas con los husos de cada árido a 800g y su filler correspondiente

Siempre se trabaja con el árido seco. Por esta razón, en muchas ocasiones se pone el árido en la estufa durante 1 día a 100 °C de temperatura, para asegurar que no haya humedad que altere el peso.

3.5 Fabricación de probetas

En este apartado se habla sobre la fabricación de las probetas. Es el proceso en el cuál se tiene que ser más preciso, ya que según la precisión van a salir resultados confiables para analizar o unos resultados totalmente erróneos.

Una vez el material está listo tal y como se ha explicado en el apartado anterior, se guardan las placas que contienen los áridos a la estufa como mínimo durante 4 horas a 160 °C. En cambio, el betún se desa 2 horas antes de la fabricación a 160 °C y sólo puede estar 4 horas en la estufa para que éste no sufre un proceso de envejecimiento muy grande. Así pues, sólo se cuenta con 2 horas para poder fabricar 17 probetas.

En primer lugar, se preparan 32 papeles circulares con un diámetro igual a los moldes de fabricación para poder hacer el ensayo Marshall sin que la muestra se estropee.

El paso dos es coger una placa, volcarla al recipiente metálico y homogenizar la mezcla dejando un hueco donde vamos a verter la cantidad de betún necesaria. Esta cantidad, debe de ser calculada anteriormente para saber cuánto betún es necesario sobre árido.

En la tabla 3.6 se presentan los % de betún sobre áridos para cada serie:

4 % betún		4,75% betún		5,5 % betún	
% ÁRIDO	96	% ÁRIDO	95,25	% ÁRIDO	94,5
% BETÚN	4	% BETÚN	4,75	% BETÚN	5,5
% BETÚN S.A.	4,17	% BETÚN S.A.	4,99	% BETÚN S.A.	5,82
Betún necesario para 800 g de árido (g)	33,33	Betún necesario para 800 g de árido (g)	39,9	Betún necesario para 800 g de árido (g)	46,56

Tabla 3.6: Betún necesario para una probeta de 5 cm.

Seguidamente, se pone el recipiente encima de la báscula y se tara. Aquí es cuando se echa el betún hasta llegar a la cantidad calculada. Acto seguido, se mezcla todo hasta que quede todo el árido envuelto con el betún aproximadamente 2 minutos. Es aquí cuando se echa el filler y se realiza el mismo procedimiento: homogeneizarlo todo hasta que no haya diferencia alguna con los distintos elementos.



Figura 3.7: Limpieza de los moldes.

Al tenerlo todo listo, con un termómetro se mide la temperatura a la cual se encuentra la mezcla, debe de estar en un rango de 155 a 160 °C. De lo contrario, las propiedades de la mezcla cambiarán y saldrán los resultados muy diferentes entre sí.

Finalmente, se pone uno de los papeles descritos anteriormente bajo el molde, se vierte la mezcla y se vuelve a poner otro papel cilíndrico.

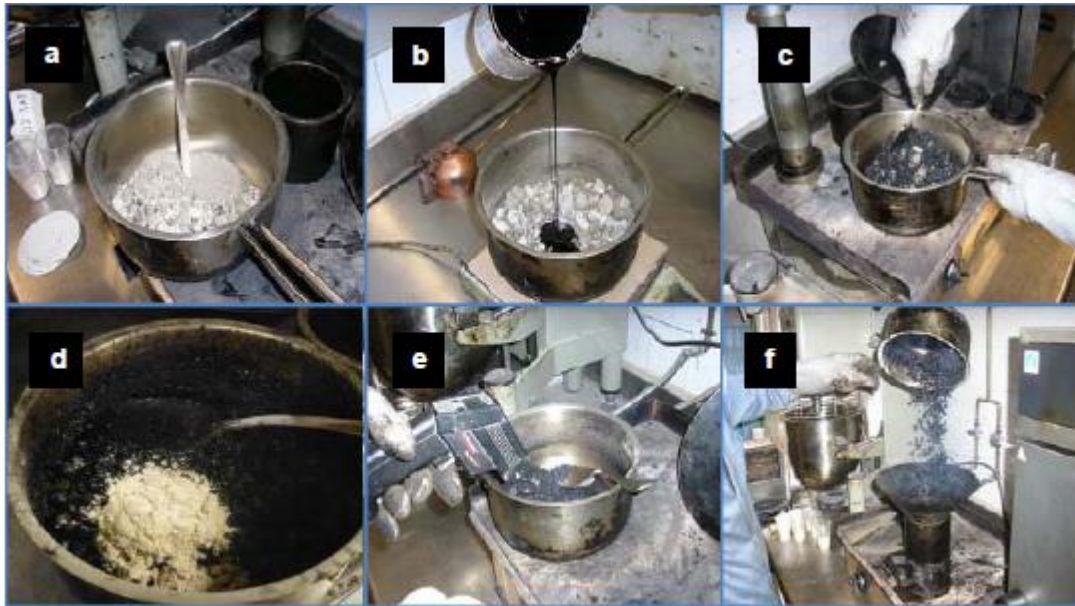


Figura 3.8: Paso a paso para la fabricación de las probetas.

Para compactar la mezcla, se usa el compactador de impacto Marshall, y como marca la normativa UNE-EN, se tiene que golpear 50 veces en cada lado del molde para el caso de una mezcla BBTM, mezcla discontinua.{13}

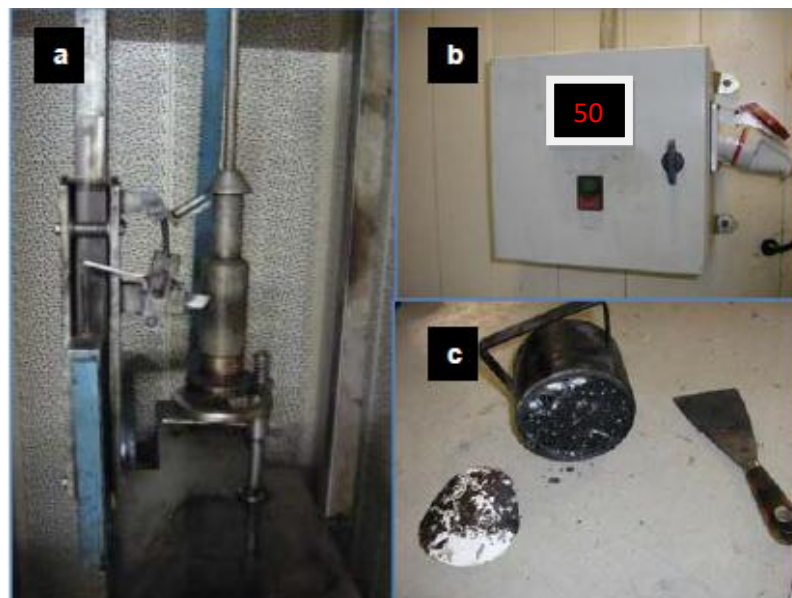


Figura 3.9: Compactador de impacto Marshall programado a 50 golpes.

Este proceso, se realiza 16 veces para completar cada serie. Una vez están todas las probetas fabricadas.

El día siguiente es cuando se puede desmoldar todas las probetas con la ayuda de un gato hidráulico e identificarlas para saber el orden de fabricación de estas.



Figura 3.10: Gato hidráulico

3.6 Determinación de la densidad y el contenido de huecos

En este apartado se describe cómo se determina la densidad de las probetas y el contenido de huecos de cada una de ellas, para así poder hacer un estudio más completo y poder determinar si es un factor importante o no en la fisuración de ellas.

Una vez desmoldadas las probetas, se miden las alturas con un pie de rey. Se realizan hasta 3 mediciones en posiciones uniformemente espaciadas según un ángulo de 60°. Posteriormente, se pesan con la misma báscula. Estos dos datos, sirven para hacer posible el cálculo de la densidad geométrica y/o teórica, ya que la densidad se define como la masa por unidad de volumen incluido el porcentaje de huecos.

El diámetro de las probetas está definido por el molde de fabricación y es de 101,6 mm (diámetro convencional de una probeta Marshall).

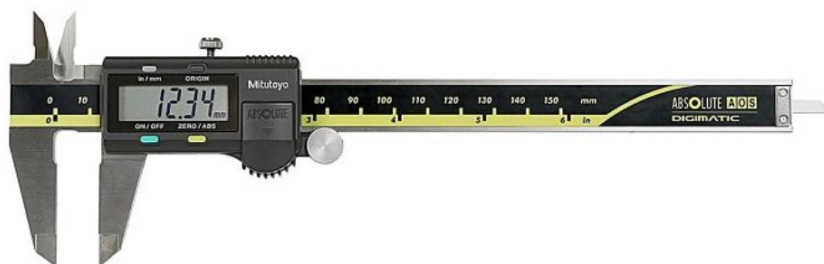


Figura 3.11: Pie de rey digital

Una vez obtenidas las medidas, la densidad geométrica se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{h_m \cdot \pi \cdot \frac{\phi^2}{4}}$$

Donde:

hm: Altura media de la probeta (cm)

Ø: Diámetro de la probeta (cm)

m: masa de la probeta (g)

Para el cálculo de la densidad máxima, se necesita hacer un ensayo más robusto, que consiste en coger la 17a probeta de la fabricación de cada serie que se ha dejado en una plata a parte y una vez enfriada, se desgrana todos los áridos con la condición de que no se pueden dejar pegados entre ellos hasta 3 mm de diámetro del grano según la Norma Española UNE-EN 1297-5:2003+A1.



Figura 3.12: Proceso de desgranación.

Una vez la muestra desgranada, se divide en dos y se ponen en dos picnómetros. Los picnómetros deben de estar secos. Es aquí cuando se pesa la muestra con el

picnómetro y el encabezado. Acto seguido, se rellenan estos con agua destilada hasta arriba y se introducen en un baño de agua a 25 °C.



Figura 3.13: Bañera de agua destilada a 25 °C.

Los picnómetros deben estar como mínimo 30 minutos en agua. También deben de estar durante 15 minutos enchufados en una máquina que sirve para la abstracción del aire al mismo tiempo. Finalmente, cada 5 minutos se debe agitar cada picnómetro para que la abstracción de aire sea más eficaz, proceso que también se hace al durante el baño. Así pues, queda completamente al vacío.

Continuando el proceso, se rellena hasta una marca que tiene el encabezado y se seca el resto con mucho detenimiento. Una vez el picnómetro está completamente seco por fuera y el encabezado seco hasta la marca dicha, se pesa de nuevo.



Figura 3.14: Pesado de la mezcla con agua destilada dentro del picnómetro.

Al finalizar este ensayo, se tiene los diferentes pesos necesarios para calcular la densidad máxima:

m1: masa del picnómetro más pieza de cabeza y matraz (g).

m2: masa del picnómetro más pieza de cabeza, matraz y muestra del ensayo (g).

m3: masa del picnómetro más pieza de cabeza, matraz, muestra del ensayo y agua o disolvente (g)

m4: masa del picnómetro más pieza de cabeza, matraz, muestra del ensayo y agua o disolvente hasta la marca de referencia (g).

Vp: Volumen del picnómetro hasta la marca de referencia (m³).

Así pues, con la fórmula siguiente de la norma Española UNE-EN 12697-8, se puede calcular la densidad máxima de las probetas.

$$\rho_{\text{máx}} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)}$$

Donde:

P_w: densidad del agua (kg/m³), viene dada por la misma norma Española UNE-EN 12697-8. Donde se indica que esta es de 997,1 kg/m³ si se trabaja a una temperatura de 25 °C.

Una vez se obtienen las dos densidades, se consigue el %Huecos con la fórmula También encontrada a la norma Española UNE-EN 12697-8. Dando el ensayo como finalizado.

$$\%H = \frac{\rho_{\text{máx}} - \rho_{\text{geométrica}}}{\rho_{\text{máx}}} \times 100$$

Este procedimiento se repite para todas las series con cada contenido de betún. {14}

3.7 Ensayo Fénix

3.7.1 Introducción y ámbito de aplicación

El ensayo Fénix es un ensayo a tracción que se ha desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la UPC para evaluar la resistencia a la fisuración de las mezclas bituminosas o asfálticas. Es un ensayo relativamente sencillo que permite determinar con bastante eficacia la resistencia, deformación, la tenacidad, etc. de la mezcla bituminosa.

En definitiva, el ensayo Fénix es capaz de simular los mismos efectos que provocan el medio ambiente y/o el tráfico. Por otro lado, al tener una historia de pocos años, se están realizando continuos tests para evaluar su sensibilidad para diferentes parámetros.

3.7.2 Descripción del ensayo Fénix

Con el ensayo Fénix se trabaja con medias probetas cilíndricas con una fisura inducida de 6 mm de profundidad. Este, trabaja siempre a tracción a una velocidad de 1 mm/min y a una temperatura escogida.

Un ensayo bien realizado de Fénix, permite obtener una curva de Carga-Desplazamiento como la que se muestra en la figura 3.14.

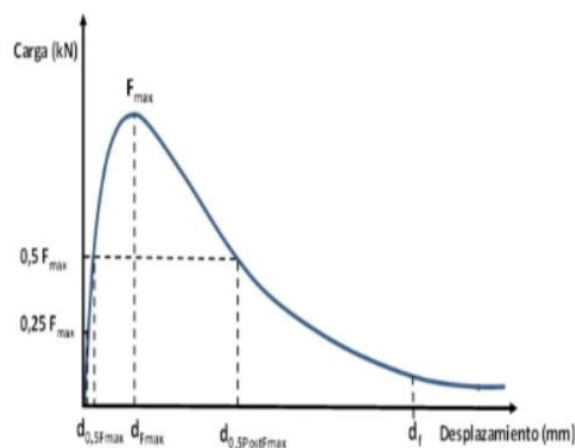


Figura 3.15: Gráfico Carga-Desplazamiento.

Hay un equipo de adquisición de datos que va registrando el desplazamiento y las cargas que se van produciendo durante el ensayo. El fin del ensayo se da cuando el

desplazamiento es superior a 4 mm y la fuerza que se está dando es de 5 KN o menos. De esta manera, a posteriori se podrán evaluar y estudiar las diferentes propiedades y parámetros que se dan al someterse a una probeta a su fisuración, que son los que veremos a continuación:

- Carga máxima a tracción ($F_{m\acute{a}x}$): registrada en el ensayo (KN).
- Desplazamiento a carga máxima ($\Delta F_{m\acute{a}x}$): Desplazamiento que sufre el pistón al someterse al ensayo (mm).
- Resistencia a carga máxima (R_T): Relación entre la carga máxima y el área de fratura.

$$R_T = \frac{1000 \times F_{m\acute{a}x}}{h \times l}$$

Donde:

R_T : Resistencia a tracción (MPa)

$F_{m\acute{a}x}$: Carga máxima a tracción (KN)

h : Espesor de la probeta (m)

l : Longitud inicial del ligamento (m)

- Energía de fractura (G_F): Trabajo disipado en el proceso de fisuración dividido entre el área de fractura perpendicular a la fuerza aplicada.

$$G_F = \frac{WD}{h \times l}$$

Donde:

G_F : Energía de fractura por unidad de superficie en el proceso de fisuración (J/m^2)

W_D : Trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) (KN·mm)

h : Espesor de la probeta (m)

l : longitud inicial de ligamento (m)

- Desplazamiento al 50% $F_{m\acute{a}x}$ postpico (Δ_{mdp}) (mm): es el registrado por la mezcla una vez que el valor de la carga ha disminuido a la mitad de la carga máxima. Es el principal parámetro para determinar la deformación que padece. Como menor sea la Δ_{mdp} , más frágil es la muestra.
- Índice de tenacidad (I_T): Es la energía disipada en el período de relajación multiplicada por un factor de fragilidad. Este factor representa el desplazamiento realizado desde la carga máxima hasta que la carga caiga a la mitad de su valor máximo. Este índice permite la evaluación de la propiedad, tenacidad. Como mayor sea el índice de tenacidad, más tenaz o más dúctil es la muestra.

$$I_T = \frac{WD - WF_{m\acute{a}x}}{h \times l} \times (\Delta_{mdp} - \Delta F_{m\acute{a}x})$$

Donde:

I_T : Índice de tenacidad (J/mm)

W_D : trabajo realizado en el proceso de fisuración (área bajo la curva Carga-Desplazamiento) (KN·mm)

$W_{F_{m\acute{a}x}}$: Trabajo disipado hasta carga máxima (KN·mm)

H: Espesor de la probeta (m)

L: Longitud inicial de ligamento (m)

Δ_{mdp} : Desplazamiento a $^{1/2}F_{m\acute{a}x}$ (mm)

$\Delta F_{m\acute{a}x}$: Desplazamiento a $F_{m\acute{a}x}$ (mm)

- Índice de rigidez a tracción (I_{RT}): Relación entre el valor medio de la carga máxima y el desplazamiento a ese valor de carga antes de la carga máxima. Como menor sea I_{RT} mayor flexibilidad tiene la mezcla.

$$I_{RT} = \frac{F_{50} - F_{25}}{d_{50} - d_{25}} \times \frac{1000}{h \times l}$$

Donde:

I_{RT} : Índice de rigidez a tracción (MPa/mm)

$F_{\text{máx}}$: Carga máxima a tracción (KN)

Δ_m : Desplazamiento antes de la carga máxima a $^{1/2}F_{\text{máx}}$ (mm)

h : Espesor de la probeta (mm)

l : longitud inicial del ligamento (mm)

3.7.3 Aplicación del ensayo

Una vez se tiene las probetas fabricadas, se cortan por la mitad y se hace un corte que penetra dentro de ellas unos 6 mm en el centro de la cara plana. Para asegurar este dato, se miden con el pie de rey las distancias desde el centro hasta el extremo obteniendo el radio de la probeta y del corte al extremo consiguiendo la distancia de ranura.

Posteriormente, se preparan 32 placas de acero, limándolas con un papel de vidrio y acto seguido con un trapo y disolvente se limpian para asegurar que las placas tengan mayor adherencia.



Figura 3.16: Papel de vidrio y disolvente

A continuación, se prepara una mezcla de unas proporciones de tres partes de cemento con una de retardador. El retardador se mezcla para que haya tiempo para adherir las probetas en las placas y el cemento para que queden bien pegadas.



Figura 3.17: Pasta cemento y retardador para adherir las probetas con las placas.

Seguidamente, se debe vigilar con que las placas queden bien alineadas para no tener futuros problemas a la hora de ajustar la probeta con las placas en la prensa. Así pues, usamos una placa grande, también de acero, para que éstas queden como se ha dicho. Para cada placa grande, caben unas cuatro probetas, una a cada lado de la placa.



Figura 3.18: Probetas pegadas a las placas bien alineadas.

Al tener las 16 probetas pegadas, se dejan reposar durante 48 horas, 24 horas a temperatura ambiente y 24 horas más dentro de la nevera, las caras A a 20°C y las caras B a 5°C.



Figura 3.19: Nevera programada a 20 °C.

Una vez se ha cumplido el tiempo de acondicionamiento, se procede a realizar el ensayo Fénix. Así que se fijan a los soportes de la prensa en posición vertical permitiendo un movimiento de rotación a los extremos de las placas. Al tener colocada la probeta a la prensa, se somete a un esfuerzo a tracción inicial de 5 KN, para acabar de ajustar la máquina. Después, con el ensayo determinado a la temperatura de 5 para las caras B y a 20°C, para las caras A, se da el inicio al ordenador que va a transmitir la información a la prensa. Éste, somete a la probeta un esfuerzo de tracción a una velocidad de desplazamiento constante de 1 mm/min.

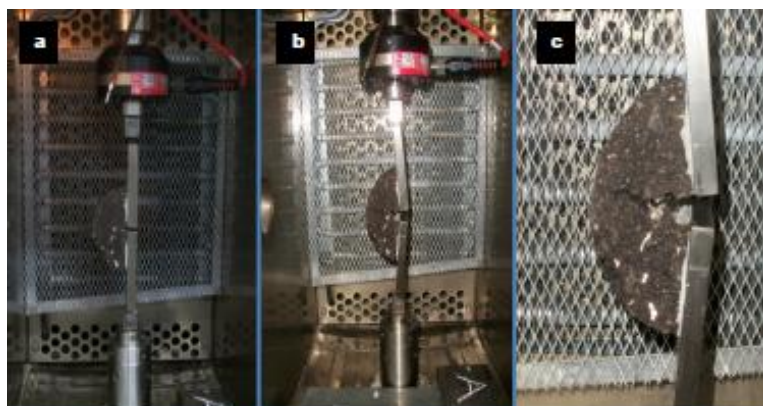


Figura 3.20: El antes y después de la prensa del ensayo Fénix.

El programa permite guardar todos los datos hasta los 10 mm del desplazamiento del pistón, pero como se ha comentado anteriormente, al tener un desplazamiento de

máximo 4 mm y una fuerza mínima de 5 kN, se puede detener, ya que se estima que las probetas ya habrán sufrido el proceso de fisuración.



Figura 3.21: Maquinaria del ensayo Fénix.

Finalmente, se colocan las piezas sobre la plancha calefactora para quitar el pegamento de las probetas de manera más fácil, ya que a una temperatura de 160°C, éste se reblandece y puede fluir con facilidad.

Así pues, se descartan las probetas ya ensayadas, y se dejan las placas limpias para ensayar otra serie.



Figura 3.22: Plancha calefactora.

3.8 Introducción y evaluación de datos

La introducción de los datos extraídos del ensayo Fénix a una plantilla de Excel proporcionada por el grupo de investigación del Laboratorio de Camins, es el siguiente paso para este plan de trabajo.

La plantilla de Excel incorpora todos los cálculos de los parámetros necesarios para el estudio y análisis de la tesis, así que simplifica los cálculos de éstos (IRT, IT, d0.5 Pm, GF, RT, etc.).

En segundo lugar, se hace un estudio estadístico de todas las probetas con la utilización del programa informático: MINITAB, que va a determinar si los resultados

tienen una distribución normal, si hay valores atípicos, si los resultados son significativos, etc.

3.8.1 Test de Grubbs'

El Test de Grubbs' se usa para encontrar los valores atípicos de una población o muestra. Este test define dos hipótesis para detectar los elementos residuales:

- H0: No hay valores atípicos registrados
- Ha: Hay exactamente un valor atípico registrado

El test estadístico se basa en la fórmula:

$$G = \frac{\max |Y_i - \hat{Y}|}{s}$$

Donde \hat{Y} y s denotan el significado de la muestra y variación estándar, respectivamente. El test estadístico de Grubbs' es el test más completo en muestra de desviación estándar. Los dos parámetros que indican los límites para el rango son:

$$G_{min} = \frac{\hat{Y} - Y_{min}}{s}$$

$$G_{máx} = \frac{\hat{Y} - Y_{máx}}{s}$$

Todos los parámetros que quedan fuera del rango de Grubbs' (G_{min} y $G_{máx}$) serán valores atípicos.

3.8.2 Descripción estadística

Este apartado dentro presenta la media, la desviación estándar, el coeficiente de variación y los intervalos de confianza a un 95%..

En conclusión, es un resumen de diferentes parámetros estadísticos que van a permitir hacer un análisis con mayor criterio.

3.8.3 Límite de repetibilidad

La repetibilidad es un parámetro que se define para dos conceptos, cualitativamente y cuantitativamente.

Cualitativamente, la repetibilidad es el grado de concordancia entre resultados independientes obtenidos por la aplicación normal y correcta del mismo método, con idéntico material de ensayo, en un corto período de tiempo, y en las mismas condiciones (mismo operador, mismo equipo, mismo laboratorio).

Cuantitativamente, la repetibilidad es el valor igual o inferior a aquél que cabe esperar que se sitúe con una probabilidad del 95% la diferencia absoluta entre dos resultados individuales, obtenidos en las condiciones indicadas anteriormente.

El límite de repetibilidad se calcula como 2,8 veces la desviación estándar.

3.8.4 Test de Normalidad (Kolmogorov-Smirnov)

En estadística, la prueba de Kolmogórov-Smirnov (K-S) es una test no paramétrico que determina el ajuste de dos distribuciones de probabilidad entre sí.

El test de Kolmogórov-Smirnov es muy sensible a los valores cercanos a la mediana que a los extremos de la distribución.

Este test viene dado por la fórmula:

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1 & \text{si } y_i \leq x, \\ 0 & \text{alternativa.} \end{cases}$$

Para dos colas el estadístico viene dado por

$$D_n^+ = \max(F_n(x) - F(x))$$

$$D_n^- = \max(F(x) - F_n(x))$$

donde $F(x)$ es la distribución presentada como hipótesis.

Este test es una de las condiciones que se analizan antes de realizar un análisis de varianzas.

3.8.5 Test de varianzas iguales (Levene)

El test de Levene es una prueba estadística que evalúa la igualdad de las varianzas para una variable calculada para dos o más grupos. Éste pone en duda la hipótesis nula de que las varianzas poblacionales son iguales. Si el p-valor resultante del test es inferior a un cierto nivel de significación ($\alpha=0,05$), es poco probable que las diferencias obtenidas en las variaciones de la muestra se hayan producido sobre la base de un muestreo aleatorio de una población con varianzas iguales. Por lo tanto, la hipótesis nula de igualdad de varianzas es rechazada y se llega a la conclusión que hay una diferencia entre las variaciones de la población.

El test de Levene se utiliza a menudo antes de una comparación de medias. Cuando la prueba de Levene muestra significación, se debe cambiar a pruebas no paramétricas.

La estadística del test es:

$$W = \frac{(N - k)}{(k - 1)} \frac{\sum_{i=1}^k N_i (Z_{i\cdot} - Z_{\cdot\cdot})^2}{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_{i\cdot})^2},$$

Donde:

W: Resultado de la prueba

k: Número de diferentes grupos a los que pertenecen los casos muestreados

N: Número total de casos en todos los grupos

N_i: Número de casos en el grupo i

Y_{ij}: Valor de la variable medida por el jésimo caso del iesimo grupo

$$Z_{ij} = \begin{cases} |Y_{ij} - \bar{Y}_{i.}|, & \bar{Y}_{i.} \text{ es la media del "i" esimo grupo} \\ |Y_{ij} - \tilde{Y}_{i.}|, & \tilde{Y}_{i.} \text{ es la mediana del "i" esimo grupo} \end{cases}$$

3.8.6 ANOVA

Este es el test que permite averiguar si una variable tiene una influencia significativa sobre alguna de las propiedades estudiadas.

Un análisis de varianza (ANOVA) prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales. Los ANOVA evalúan la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores. La hipótesis nula establece que todas las medias de la población son iguales mientras que la hipótesis alternativa establece que al menos una es diferente.

El nombre “análisis de varianza” se basa en el enfoque en el cual el procedimiento utiliza las varianzas para determinar si las medias son diferentes. El procedimiento funciona comparando la varianza entre las medias de los grupos y la varianza dentro de los grupos como una manera de determinar si los grupos son parte de una población más grande o poblaciones separadas con características diferentes.

Las expresiones para el cálculo de los elementos intervienen en el ANOVA son los siguientes:

➤ Media Global: $\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^K \cdot \sum_{i=1}^{n_j} X_{ij}}{n}$

➤ Variación Total: $SCT = \sum_{j=1}^K \cdot \sum_{i=1}^{n_j} \cdot (x_{ij} - \bar{X})^2$

➤ Variación Intra-grupos: $SCD = \sum_{j=1}^K \cdot \sum_{i=1}^{n_j} \cdot (x_{ij} - \bar{X}_j)^2$

➤ Variación Inter-grupos: $SCE = \sum_{j=1}^K \cdot (\bar{X}_j - \bar{X})^2 \cdot n_j$

Donde:

K = Muestras sobre las que se aplican los tratamientos.

\bar{X} = Es la media de las muestras.

X_{ij} = El i-ésimo valor de la muestra j-ésima.

N_j = El tamaño de la muestra.

Si el test de Levene determina que las varianzas son iguales, es decir no hay significancia en el test, en ANOVA se usa el test de Tukey. Por lo contrario, hay significancia en el test, se usa el test de Games-Howell.

Test de Tukey:

La prueba de Tukey compara los medios de cada tratamiento con los medios de cualquier otro, es decir, se aplica simultáneamente al conjunto de todas las comparaciones por partes ($\mu_i - \mu_j$) e identifica cualquier referencia entre dos medios que sean mayor que el error estándar esperado. El coeficiente de confianza para el conjunto, cuando todos los tamaños de muestra son iguales, es exactamente $1 - \alpha$ para $0 < \alpha < 1$.

Para tamaños de muestra desiguales, el coeficiente de confianza es mayor a 1. En otras palabras, el método de Tukey es conservador cuando hay tamaños de muestra desiguales.

Este test de Tukey es esencialmente una prueba T-student, pero corrige la tasa de error familiar, cuando se realizan comparaciones múltiples, aumenta la probabilidad de cometer un error de tipo I en al menos una de las comparaciones, por lo tanto es una prueba más adecuada.

La fórmula para la prueba de Tukey es:

$$qs = \frac{Ya - Yb}{SE}$$

Donde:

Ya: Media más grande.

Yb: Media más pequeña.

SE: Es el error estándar de la suma de los promedios.

Este valor de q_s se puede comparar con un valor q de la distribución de rango estudiantil. Si el valor de q_s es mayor que el crítico q_α , obtenido de la distribución, se dice que los dos medios son significativamente diferentes en el nivel α , $0 < \alpha < 1$.

Dado que la hipótesis nula para la prueba de Tukey establece que todos los medios que se comparan pertenecen a la misma población, es decir: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$, los medios deben distribuirse normalmente. Esto da lugar a la suposición de normalidad de este test.

Test de Games-Howell:

La solución de Games-Howell para el problema de la no homogeneidad se basa en la prueba de Tukey-Kramer, y es idéntica a ella en el caso en que los estimadores de las varianzas sean todos iguales.

La fórmula que lo define es:

$$\Psi_{(GH)} = q_{\alpha,p,v} \sqrt{\frac{\left(\frac{\theta_j^2}{n_i} + \frac{\theta^2}{n_j}\right)}{2}}$$

En el caso en que sean distintos esos estimadores de las varianzas, el test de Games-Howell ofrece valores más acordes con las discrepancias entre ellas. Así pues, el test de Games-Howell es un test que analiza dos poblaciones que tienen varianzas desiguales y da el grado de significancia de ellas. {10}

Una vez se haya realizado todo el procedimiento experimental y el plan de trabajo estadístico, se van a procesar los datos, graficándolos o bien en tablas para poder hacer una valoración de los parámetros y ver las diferencias que presenta el hecho de cambiar el % de contenido de betún y el cambio de temperatura de 5 a 20 °C.

Capítulo 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Introducción

Al terminar la parte práctica del laboratorio, empieza el análisis de resultados. En este apartado se calcula, evalúa y grafican todos los parámetros que se encuentren interesantes para poder hacer un estudio completo con un criterio estadístico.

Los parámetros que se han variado en esta tesis son los % de contenido de betún y las temperaturas de ensayo. Por este motivo, este capítulo se centra en gran parte en estos parámetros y los efectos que causan sus variaciones a la rigidez y ductilidad antes de llegar a la fisuración de las probetas.

4.2 Resultados y análisis del ensayo densidad máxima para % contenido de huecos

En el apartado 4.2, el principal objetivo es determinar los resultados dados por el ensayo de densidades máximas. Así pues, después de realizar ese ensayo, con las fórmulas descritas en el estudio experimental apartado 3.6, se pueden obtener los siguientes resultados para cada % de betún.

A partir de los resultados se van a observar unas gráficas realizadas con el programa Excel y así, poder analizar el contenido.

Los resultados de los % de huecos para cada % de betún son los siguientes:

BBTM 8B 4%		Huecos (%)	
Media	Int. Inf. M Int. Sup. M		21,11
Desvest (Sr)			0,62
COV (%)			2,94
Intervalos de confianza 95% para la Media			20,77
Límite de repetibilidad (r)			21,45
r%			1,74
			8,22

Tabla 4.1: Resumen de los huecos de la mezcla BBTM 8B 4%.

Después de realizar el test de Grubbs' las 16 probetas ensayadas con un 4% de betún, se ha desestimado la probeta 4 ya que era un valor atípico que alteraba la muestra.

Al referenciarnos con el límite de repetibilidad se aprecia que éste es un valor bajo (1,74), por lo tanto que es un parámetro que no tiene mucha dispersión, específico de este contenido de betún.

BBTM 8B 4,75%		Huecos (%)	
Media	Int. Inf. M Int. Sup. M		15,56
Desvest (Sr)			0,50
COV (%)			3,23
Intervalos de confianza 95% para la Media			15,29
Límite de repetibilidad (r)			15,63
r%			1,41
			9,05

Tabla 4.2: Resumen de los huecos de la mezcla BBTM 8B 4,75%.

En el 4,75 % de contenido de betún, no se ha desestimado ningún resultado al hacer el test de Grubbs'. La desviación estándar se puede saber a partir del test de Normalidad, y asegura que la distribución es normal.

El límite de repetibilidad también es representativo del contenido de betún, ya que tanto r como $r\%$ tienen valores bajos.

BBTM 8B 5,5%		Huecos (%)	
Media			15,60
Desvest (Sr)			0,70
COV (%)			4,50
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M		15,23
	Int. Sup. M		15,97
Límite de repetibilidad (r)			1,96
$r\%$			12,59

Tabla 4.3: Resumen de los huecos de la mezcla BBTM 8B 5,5%.

Al analizar el 5,5% de betún, no se ha desestimado ningún resultado al hacer el test de Grubbs'. La desviación estándar se sabe a partir del test de Normalidad, y asegura que la distribución es normal.

Al fijarnos con el límite de repetibilidad, podemos apreciar que también es un valor bajo, así que al igual que los otros dos, es un valor representativo de la muestra.

4.2.1 Comparación de los resultados en el ensayo de densidad máxima (% de huecos)

Al comparar los tres contenidos de betún nos damos cuenta de que la mezcla BBTM 4,75% y la mezcla BBTM 5,5% tienen valores muy parecidos, entre 15 y 16 % de huecos. Por lo contrario, la mezcla BBTM 4% de betún coge una media superior que se encuentra a unos 21 en % de huecos.

Al fijarnos en la tendencia observamos que ésta disminuye mucho entre el 4 y el 4,75% de betún.

Los límites expresados en la leyenda son los especificados por el Pliego artículo 543, donde implantaron que el rango de % de huecos tiene que estar entre 12 y 18 y según

el BOE tabla 543.9, el mínimo contenido de betún que se puede poner a una mezcla BBTM 8B es de 4,75%.

Así pues, vemos que los porcentajes 4,75% y de 5,5% cumplen con dicha implantación y en cambio el del 4% se queda fuera del rango.

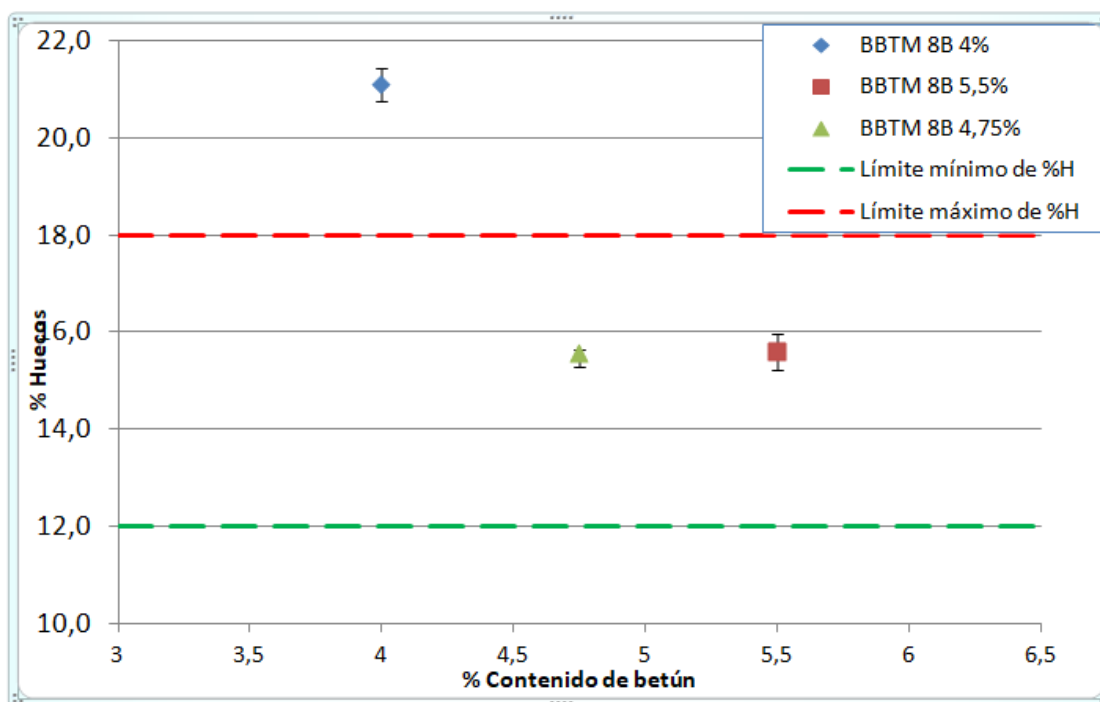


Figura 4.1: % Contenido de huecos - % Contenido de betún.

4.3 Parámetros de de rigidez del ensayo Fénix

Esta tesis está encarada principalmente para dos conceptos. La rigidez del material tratado y la deformación. En este apartado se va a analizar el primero, la rigidez. Como se ha visto anteriormente en otras partes de esta tesis, los parámetros que definen mejor la rigidez del material son el Índice de Rigidez a Tracción (IRT), la Resistencia de Fractura (RT) y la Energía de Fractura (GF).

Por esta razón, en este apartado se van a presentar los gráficos extraídos del ensayo Fénix según el contenido de betún y la temperatura. Este hecho, va a proporcionar mayor precisión y simplicidad al análisis, llegando a unas conclusiones aún desconocidas.

4.3.1 Índice de Rigidez a Tracción (IRT)

Como ya se ha redactado a lo largo del trabajo, el Índice de Rigidez a Tracción es la pendiente de la curva Carga-Desplazamiento entre el 25 y 50% de la carga máxima. Así pues, vamos a analizar dicha pendiente.

Al tener mayor pendiente entre el rango de 25 y 50%, mayor es la rigidez y viceversa. A priori, se tiene el conocimiento lógico de que a menor temperatura de ensayo, mayor rigidez. Por esta razón nos vamos a centrar en el parámetro de contenido de betún.

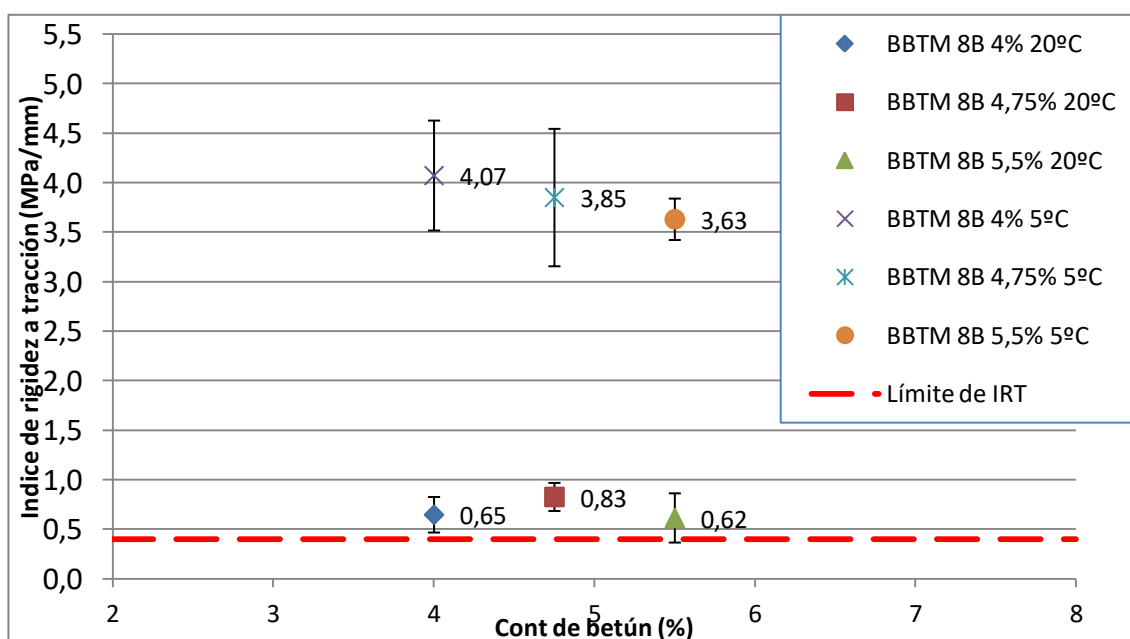


Figura 4.2: Índice de rigidez a tracción – % Contenido de betún

➤ 20 °C

Con el gráfico no se aprecia muy bien las diferencias de IRT ya que varía muy poco a 20 °C. Por esta razón, se ha mirado el análisis estadístico, el 4 y 5,5% de betún tienen un comportamiento similar en las varianzas a diferencia del 4,75% de betún que significativamente difieren. Así lo muestra el test de Tukey en los Anejos: Tests.

También se aprecia que pasa lo mismo con respecto a las medias de las muestras, obteniendo como valor máximo el de 4,75% de betún y quedando una tendencia en forma de parábola.

Según el límite de IRT establecido por Dr. Pérez Jiménez el valor de 0.40 MPa/mm, el 4,75% de betún lo cumple sin duda alguna, en cambio al hablar del 4% de betún, cumple por la mínima, y el 5,5% de betún, cumple al fijarnos con la media, pero su dispersión queda un poco por debajo.

Al fijarnos en la repetibilidad de las IRT según el % de betún, son de 0,5, 0,4 y 0,7 a modo creciente y respectivamente tal y como se encuentra en las tablas resumen de Anejos.

➤ 5 °C

A 5 °C, los valores de IRT muestran una tendencia decreciente con el contenido de ligante. Así pues, el valor máximo lo representa el 4% de contenido de betún con una media de 4,07 MPa/mm.

Otro factor es que la desviación estándar (S_r), es mucha más alta que de las muestras de 20 °C, quedando así, un límite de repetibilidad más alto tal y como se muestra en Anejos: tablas resumen.

Del test de Levene surge que las varianzas de las 3 muestras no son iguales y por tanto se ha hecho el test de Games-Howell que sí ha demostrado que los grupos son significativamente diferentes. Quedando 4 y 4,75% mezclas de un mismo grupo, y 4,75 y 5,5%, otro Es decir, la mezcla 4,75 % se encuentra en los dos grupos.

4.3.2 Resistencia a Tracción (RT)

Otro parámetro que define la rigidez de un material es la Resistencia a Tracción (RT). Es la fuerza que se tiene que hacer para que sufra un desplazamiento a tracción hasta la fisuración. Por esta razón, se cree conveniente analizar este parámetro con atención.

Aquí se adjunta un gráfico para tener un resultado más visual y con la ayuda de los tests realizados poder obtener un análisis con el máximo criterio posible.

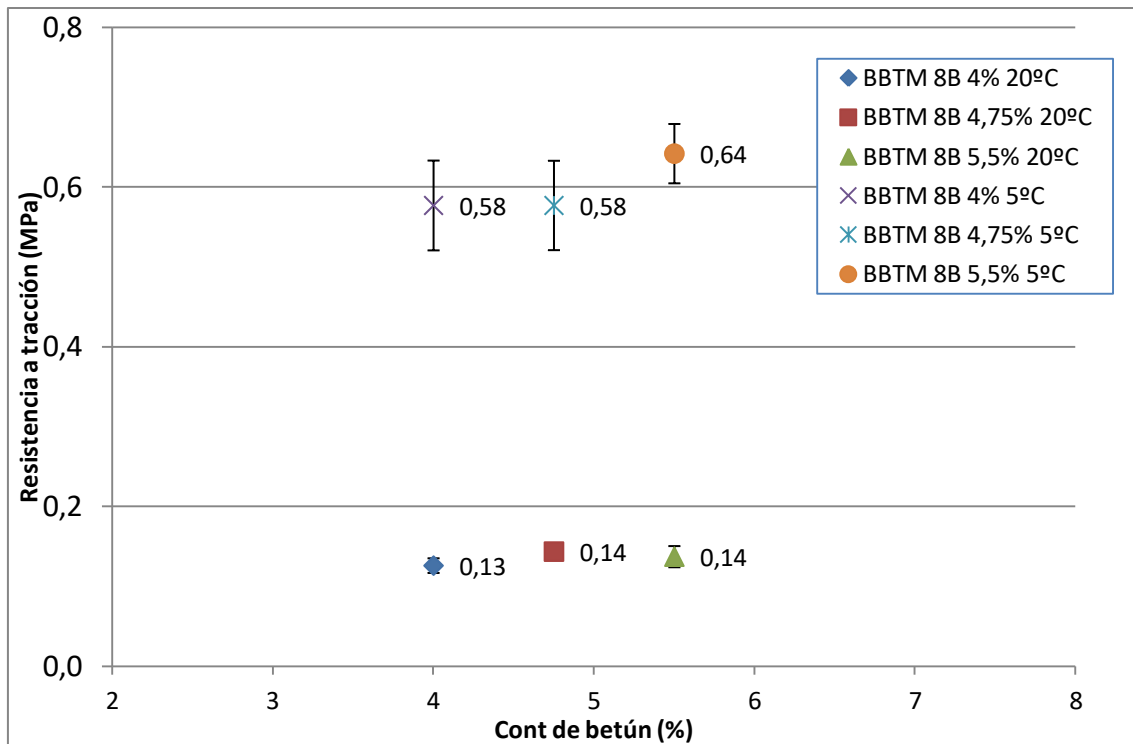


Figura 4.3: Resistencia a tracción - % Contenido de betún

Haciendo referencia al gráfico vemos que la temperatura a 5 °C es mucha más alta que con 20 °C.

➤ 20 °C

La tendencia es una suave parábola convexa dando el máximo valor al 4,75% de contenido de betún. Las dispersiones son muy bajas del orden del 0,008 al 0,01 y las medias muy parecidas. Esto, nos hace sospechar si los parámetros son estadísticamente diferentes, y al realizar el análisis estadístico el ANOVA y el test de Tukey, se confirma que el grupo 4 % es el diferente.

El límite de repetibilidad es muy bajo, ya que es un parámetro dependiente de las dispersiones típicas.

➤ 5 °C

A 5 °C, la tendencia es creciente. Así pues, el valor mínimo es el 4 % de contenido de betún. Las dispersiones ya ofrecen un rango más elevado, pero siguen teniendo una distribución normal.

El test de Levene confirma que las muestras tienen varianzas iguales y, al hacer el test ANOVA más Tukey, se confirma que la muestra con 5,5 % de betún es estadísticamente diferente.

Por último, comentar que el límite de repetibilidad ya no es tan bajo como en la temperatura a 20 °C, ya que las dispersiones tal y como podemos apreciar en el gráfico o en la tabla resumen, son un poco mayores.

4.3.3 Energía de Fractura (GF)

Es el parámetro que determina la energía disipada durante la rotura de la probeta. Cuanto mayor es la Energía de Fractura (GF), mayor es la resistencia a la fisuración de la mezcla. Así pues, en este apartado se va a determinar en qué temperatura la energía es mayor y las tendencias al variar el % de contenido de betún.

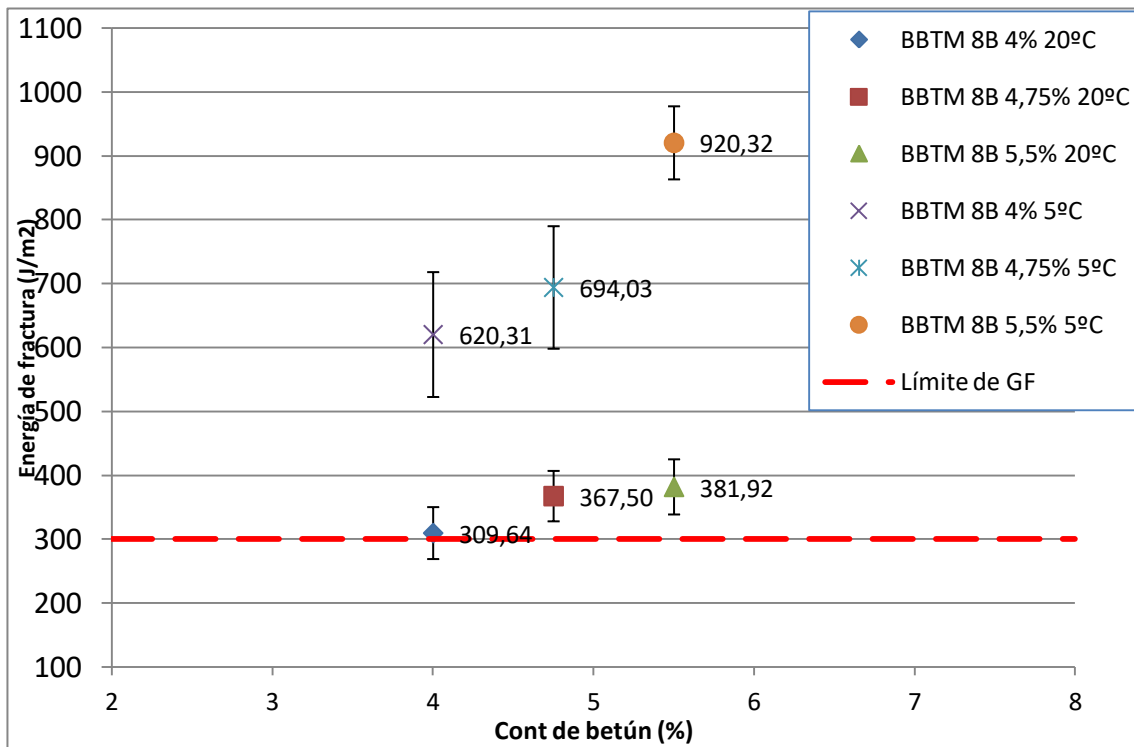


Figura 4.4: Energía de fractura - % Contenido de betún

➤ 20 °C

La tendencia de las mezclas ensayadas a 20 °C, ofrece una curva creciente con el máximo en el 5,5 % de contenido de betún. La dispersión de los resultados es similar en las tres mezclas. Según el test de Levene, las varianzas son homogéneas, pero al fijarnos en el test de ANOVA y en Tukey, obtenemos que estadísticamente sean diferentes con una agrupación de 4 % de contenido de betún por un lado, y el 4,75 y 5,5 % de contenido de betún por otro.

El límite impuesto por los investigadores es de 300 J/m^2 , y como se aprecia en la gráfica, los contenidos de 4,75 y 5,5 % de contenido de betún cumplen en media y desviación estándar, en cambio, el 4 % de contenido de betún, cumple en media pero su desviación estándar queda por debajo. Así pues, este contenido no cumpliría en dicho límite.

➤ 5 °C

A diferencia de la temperatura de 20 °C, a 5 °C la tendencia también es creciente pero más acusada dejando como máximo el 5,5 % de contenido de betún. Se obtiene una dispersión mucho mayor y una Energía de Fractura (GF) de $600 - 900 \text{ (J/m}^2\text{)}$, superando el límite propuesto de GF sin dificultad. Las desviaciones estándar son mucho menores que a 20 °C. En el Test de ANOVA y Tukey, obtenemos que sí son estadísticamente diferentes y Tukey las clasifica como grupo A el 5,5 % de contenido de betún y grupo B los dos restantes.

La conclusión que sacamos respecto a los parámetros de rigidez, es que la temperatura determina mucho la rigidez del material, ya que a 5 °C se obtienen valores mucho mayores. Las dispersiones también vienen condicionadas por la temperatura, y en cambio, el % de contenido de betún no presenta unos cambios muy importantes.

4.4 Parámetros de deformación del ensayo Fénix

El otro concepto tratado en este apartado, es la deformación. Se va a realizar un análisis de los parámetros que la describen. Los dos parámetros principales son el Desplazamiento del 50% de la carga postpico ($d_{0,5Pm}$) y el Índice de Tenacidad (IT).

Por esta razón, en este apartado se van a presentar los gráficos extraídos del ensayo Fénix según el contenido de betún y la temperatura.

4.4.1 Índice de Tenacidad (IT)

Este parámetro permite valorar el comportamiento más o menos dúctil de la mezcla, es decir, si la mezcla es capaz de alcanzar un mayor o menor deformación hasta rotura, manteniendo parte de su resistencia desde que inicia su fallo hasta que éste realmente se produce.

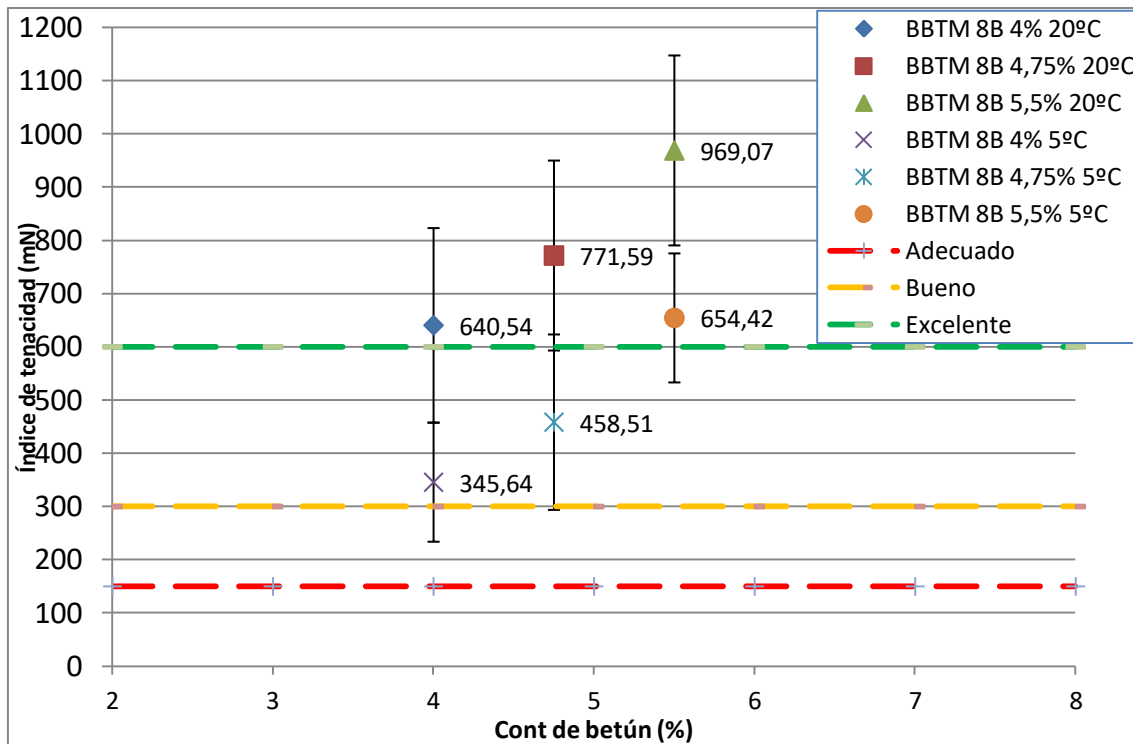


Figura 4.5: Índice de tenacidad - % Contenido de betún

Al mirar la gráfica, ya de antemano podemos apreciar la gran dispersión que contiene cada mezcla tanto a 5 como a 20 °C. También se puede apreciar que la deformación que puede sufrir la mezcla BBTM es mayor a una temperatura de 20 °C que la de 5°C.

➤ 20 °C

La tendencia de la mezcla es clara. Se puede observar que es una tendencia que va en sentido creciente de menor contenido de betún a mayor.

La gran dispersión observada, nos hace dudar sobre las diferencias entre los grupos analizados, así pues, se realizan los tests estadísticos para así obtener un mayor criterio. Al hacer ANOVA y Tukey, podemos asegurar que tienen una diferencia significativa con el contenido de betún del 4% y con los contenidos de 4,75 y 5,5%.

Según los criterios, la mezcla de 4% de betún y la de 4,75 %, se encuentran entre una calificación de excelente y bueno tal y como indican los límites, aunque el 4,75% de contenido de betún con un grado de excelencia mayor. Al referenciarnos con el contenido del 5,5%, se puede observar que tanto la media como la dispersión que tiene, se encuentra sobre el límite de la excelencia. Así pues, a mayor % de contenido de betún, mayor deformación.

➤ 5 °C

La tendencia a 5 °C es muy parecida a la de 20 °C, lineal y con sentido creciente de menor contenido de betún a mayor. Tanto en el gráfico como en los cálculos realizados para obtener la dispersión estándar (S_r), se aprecia que estas dispersiones son menores que con las de 20 °C, pero tampoco se puede determinar si hay diferencias significativas. Por esta razón, nos volvemos a mirar los tests de estadística.

El test de Levene, nos indica que las varianzas son homogéneas, aunque. Al realizar ANOVA más Tukey, se determina que el 4% de contenido de betún difiere del resto.

Con respecto a los límites propuestos, a 5 °C, el nivel de ductilidad ya no es tan elevado, ya que el 4 y el 4,75% de contenido de betún se encuentran entre adecuadas y buenas según los límites establecidos, y la mezcla de 5,5%, con un grado de clasificación de entre buenas y excelentes. Así pues, como a 20 °C, a mayor % de contenido de betún, mayor deformación.

4.4.2 Desplazamiento del 50% de la carga post-pico ($d_{0,5Pm}$)

Como parámetro alternativo al Índice de Tenacidad (IT) se usa también el Desplazamiento correspondiente al 50 % de la carga máxima en la zona post-pico ($d_{0,5Pm}$), que permite valorar también la ductilidad y tenacidad de la mezcla.

Aunque ya se ha podido ver las tendencias que ocasiona el parámetro de la deformación en el apartado anterior, éste apartado nos servirá para o acabar de demostrar lo dicho, o tener en cuenta otros factores que se nos hayan pasado por alto o no se podían apreciar en el apartado 4.4.1.

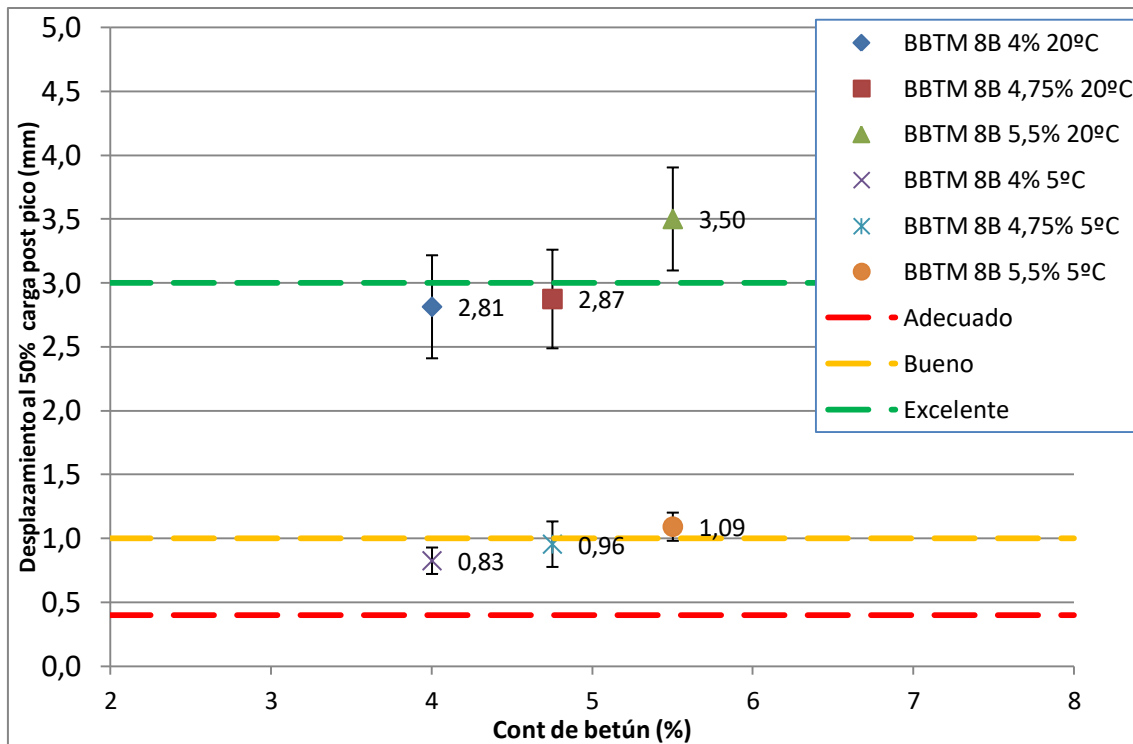


Figura 4.6: Desplazamiento al 50 % carga post-pico - % Contenido de betún

➤ 20 °C

La tendencia sigue la misma curva que en el Índice de Tenacidad (IT), es decir, una tendencia creciente. Dejando así como valor máximo el contenido de betún del 5,5 %.

ANOVA acaba concluyendo que sí son grupos diferentes, y el test de Tukey separa el grupo de 5% y 4,75% del grupo con 5,5% de betún

La mezcla con mayor contenido de betún, se encuentra por encima del límite de excelencia, en cambio, las mezclas de 4 y 4,75 % de contenido de betún están por encima del límite de bueno.

➤ 5 °C

La forma de la tendencia en este caso es más lineal que en el caso anterior, pero sigue siendo creciente de menor a mayor contenido de betún. Las mezclas tienen una deformación mucho más bajas que las ensayadas a temperaturas de 20 °C, pero también cumplen los límites establecidos, quedando las mezclas de 4 y 4,75 % de contenido de betún como adecuadas y la de 5,5 % de betún justo al límite de mezcla buena.

Las mezclas a esta temperatura tienen muy poca dispersión y al hacer los tests, se acaba determinando que son estadísticamente diferentes quedando

clasificadas en tres grupos diferentes A (5,5 % de betún), B (4,75 % de betún) y C (4 % de betún).

Las conclusiones en este apartado tratado exclusivamente por la deformación que sufre el material, encontramos que a 20 °C tiene mucha más deformación que a 5 °C así pues, responde a lo esperado, ya que la viscosidad del betún baja con el incremento de la temperatura.

Todas las tendencias son crecientes de menor contenido de betún a mayor, quedando así como valor máximo el 5,5 % de betún, ya que es un material muy viscoso que es el principal y único elemento que provoca la deformación de las mezclas estudiadas.

Por lo tanto, una probeta ensayada a 20 °C y con un contenido de betún del 5,5, será la que dispondrá de mayor deformación y por lo tanto menor riesgo de ser fracturada y o fisurada.

4.5 Relación de Rigidez vs Deformación

4.5.1 IRT vs Parámetros de deformación

Después de haber analizado en los dos apartados anteriores los parámetros de rigidez y deformación por separado y haber determinado unas conclusiones claras, en este apartado se van a analizar en conjunto, para así, poder afirmar con seguridad cuál es el porcentaje de betún que obtiene mejor resultados, teniendo en cuenta las propiedades estudiadas en este Trabajo de fin de Grado.

Así pues, vamos a mantener la misma metodología del capítulo 4, mostrando gráficos y graficando los límites propuestos para acabar concluyendo el rango de contenido de betún recomendado.

En acto seguido, se van a mostrar los gráficos con eje Y que contendrán los parámetros que definen mejor la rigidez del material y en el eje X, los parámetros que muestran el nivel de deformación.

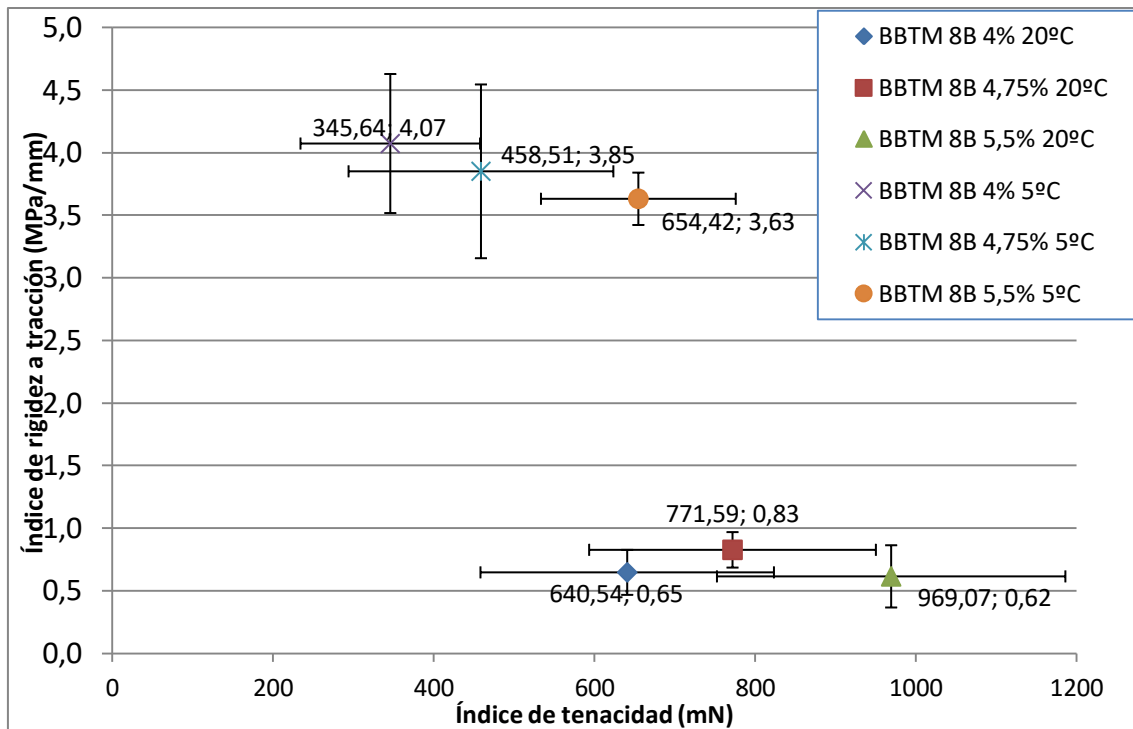


Figura 4.7: Índice de rigidez a tracción – Índice de tenacidad

Al comparar las temperaturas en conjunto se aprecian claramente dos grupos. El grupo de 20°C y el grupo de 5 °C. Éstos, presentan diferentes tendencias. El grupo de 20 °C, una parábola convexa con máximo a la mezcla BBTM 4,75%, y en el grupo 20 °C, una tendencia lineal con sentido decreciente de menor contenido de betún a mayor cantidad.

Observamos que la tenacidad definida por el Índice de Tenacidad (IT) es muy parecida en la mezcla BBTM 5,5 % a 5 °C con la BBTM 4 % a 20 °C, siendo un poco superior la mezcla BBTM 5,5 % a 5 °C. Incluso, podríamos decir que tiene también una cierta semejanza con la BBTM 4,75 % a 20 °C. Y siempre con una rigidez definida por el Índice de Rigidez (IRT), considerablemente superior.

Al imponer los límites establecidos durante este capítulo, se va a poder analizar y razonar mejor, para acabar determinando el rango de betún recomendado. Así pues, se adjunta el siguiente gráfico:

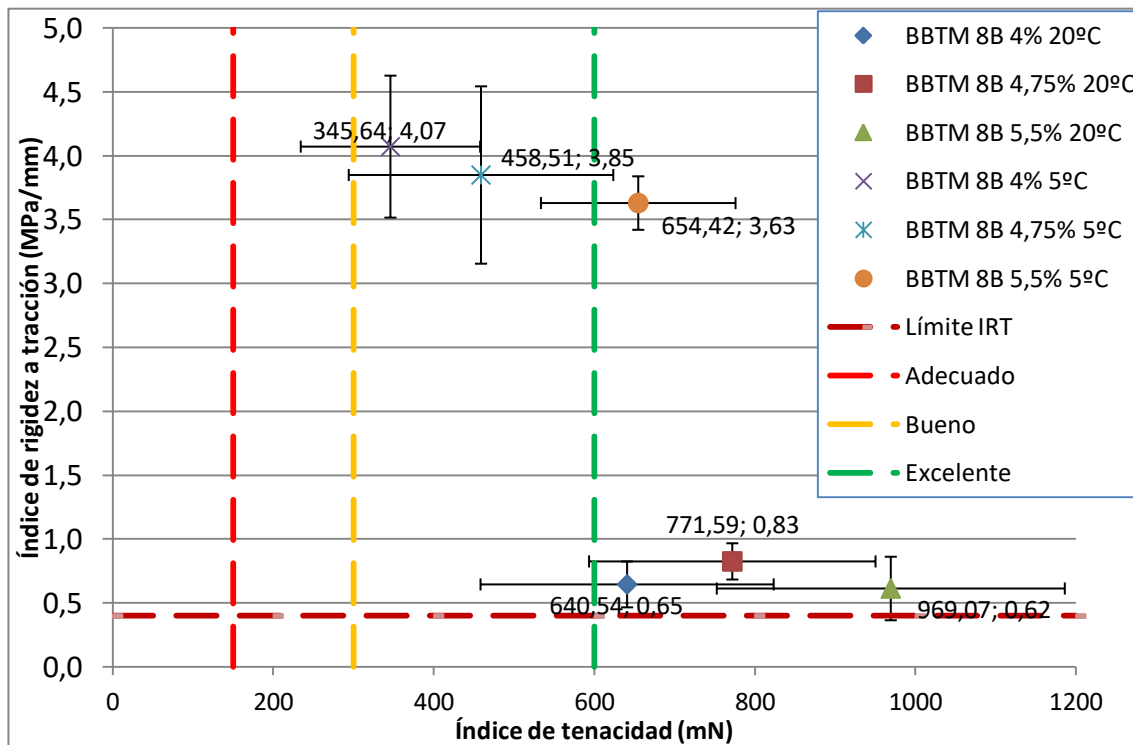


Figura 4.8: Índice de rigidez a tracción – Índice de tenacidad

A temperatura de 20 °C, las mezclas cumplen de manera muy justa el límite de IRT, e incluso la dispersión de la mezcla BBTM a 5,5%, queda un poco por debajo.

Por esta razón, nos fijamos más en las muestras ensayadas a 5 °C, que cumplen sobradamente este límite. Al observar los límites del Índice de Tenacidad (IT), apreciamos que todas las mezclas se encuentran por encima del límite mínimo, quedando la mezcla BBTM 8B a 5,5% con una media por encima de la excelencia, y una dispersión entre la excelencia y una mezcla buena.

A continuación, se quiere evaluar el mismo parámetro IRT con el otro parámetro que describe la deformación, el Desplazamiento al 50 % de la carga máxima post-pico (d0,5Pm).

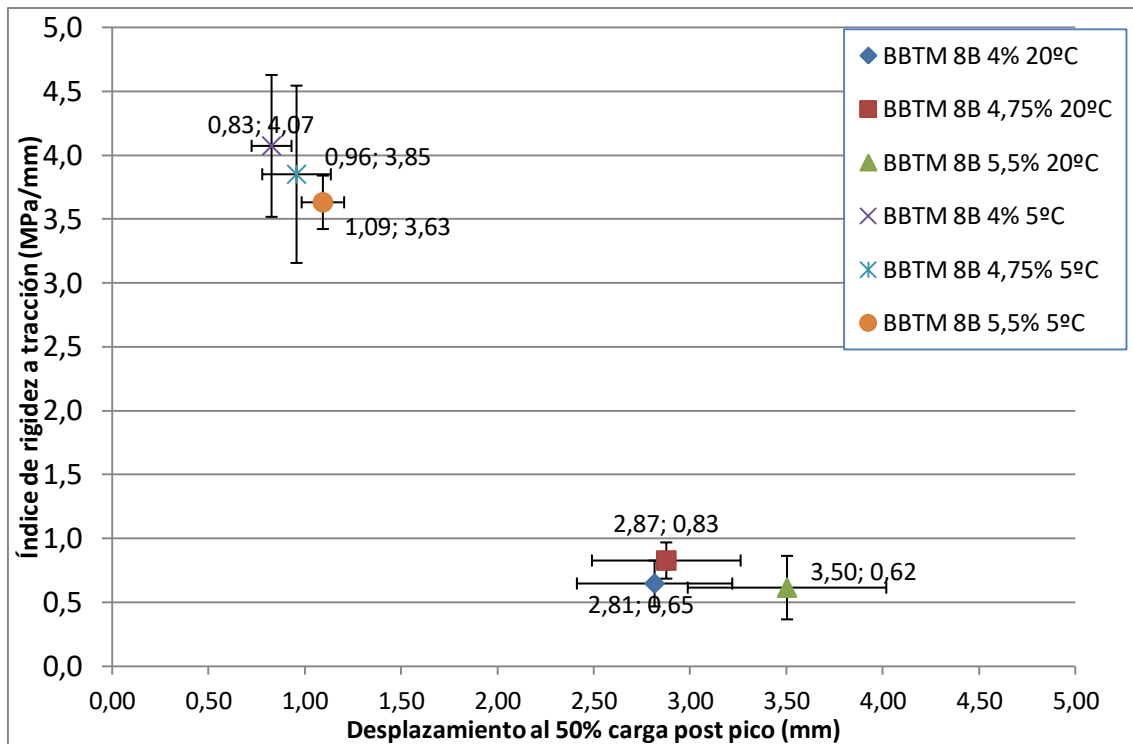


Figura 4.9: Índice de rigidez a tracción – Desplazamiento al 50 % carga post-pico

A simple vista se observa la misma tendencia que nos hemos encontrado en los dos gráficos anteriores. Los dos grupos son independientes según las temperaturas que se han empleado en el ensayo Fénix, mostrando más rigidez que deformación a 5 °C y viceversa con las mezclas ensayadas a 20 °C.

Al estar tan separados entre sí, se van a poner los límites establecidos, para poder asegurar el cumplimiento de las mezclas. Así que el siguiente gráfico nos va a permitir hacer una mayor valoración.

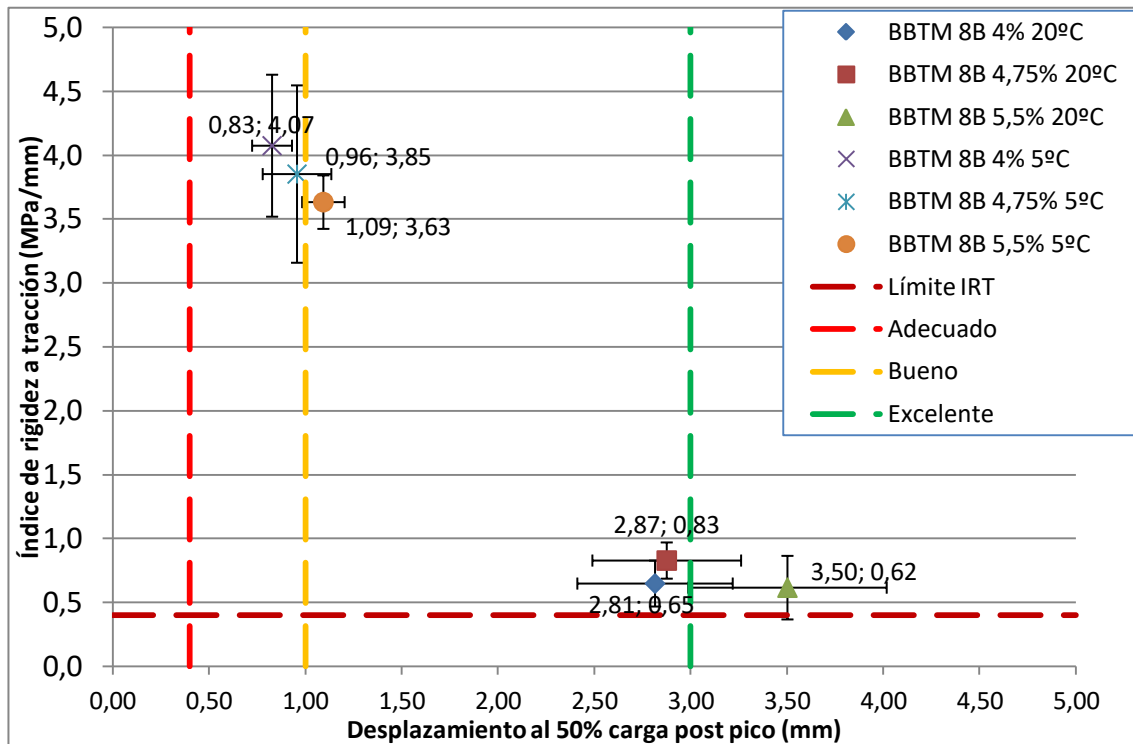


Figura 4.10: Índice de rigidez a tracción – Desplazamiento al 50 % de la carga post-pico

Al imponer los límites para dicho cumplimiento, se ve que a 20 °C las mezclas de BBTM 8B de 4 y 4,75 % están por encima del límite, en cambio, la dispersión de la mezcla de 5,5 % de contenido de betón sobrepasa el límite.

A la temperatura de 5 °C, los tres puntos con sus dispersiones se encuentran muy por encima del límite, por lo tanto no tienen problema alguno con el límite establecido.

Al fijarnos con los límites de desplazamiento al 50 % de carga post-pico, observamos que las mezclas a 20 °C se comportan como buenas y la del 5,5 % excelente. Por otro lado, las mezclas ensayadas a 5 °C se comportan como adecuadas menos la de 5,5 % que la podemos clasificar como buena.

4.5.2 GF vs Parámetros de deformación

El otro parámetro que se quiere analizar con el Índice de Tenacidad (IT) y el Desplazamiento al 50 % de la carga post-pico es la Energía de Fractura (GF).

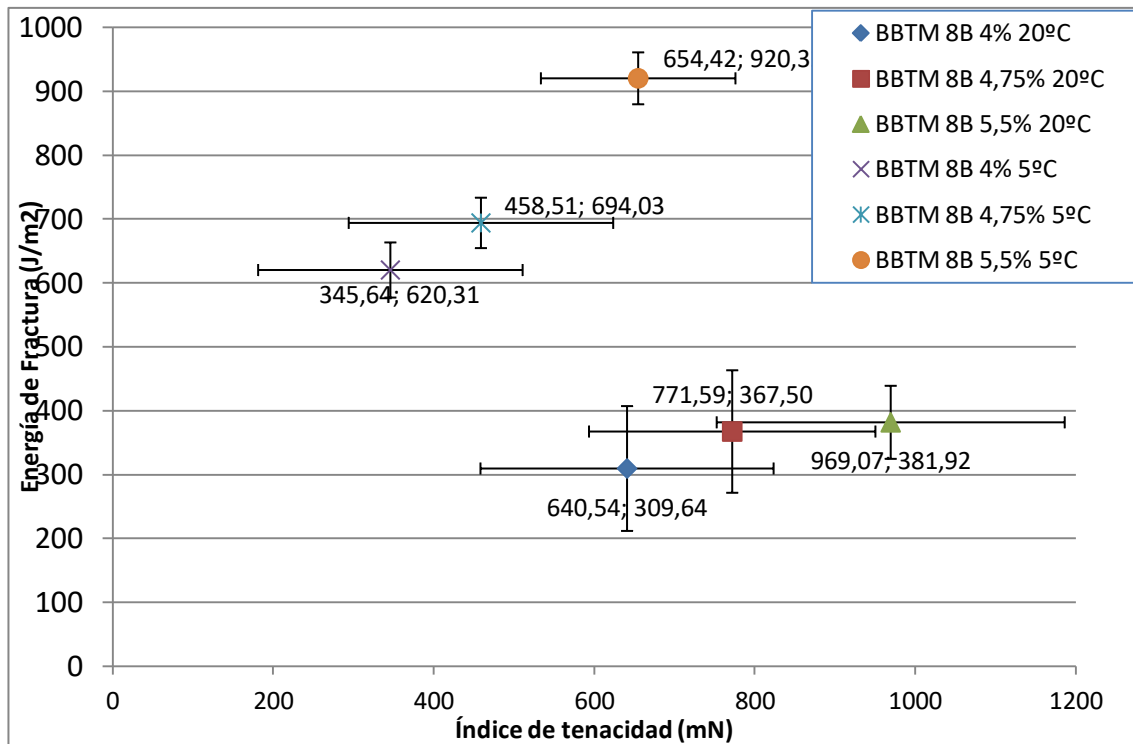


Figura 4.11: Energía de fractura – Índice de tenacidad

Al analizarlo, si que se puede apreciar según la temperatura los grupos, pero no están muy separados entre sí. Las tendencias parecen del tipo exponencial en el caso de ensayar a temperatura a 5 °C y logarítmica a 20 °C.

Para apreciar si las mezclas son admisibles según los criterios fijados, vamos a imponer en el gráfico sus límites, y así, poder garantizar el buen funcionamiento de la mezcla.

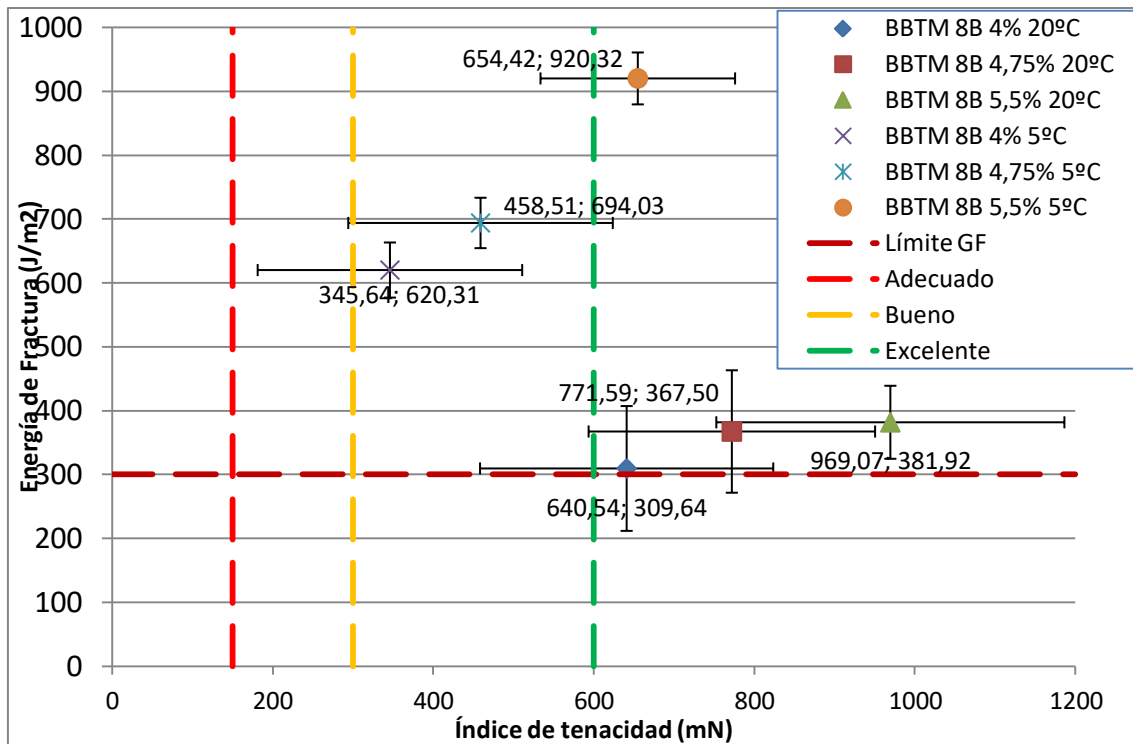


Gráfico 4.12: Energía de fractura – Índice de tenacidad

Con este gráfico, podemos asegurar que las mezclas BBTM 8B a temperatura 20 °C y contenidos de betún 4 y 4,75%, quedan fuera del límite de la Energía de Fractura (GF), por sus dispersiones.

Al centrarnos con los límites del Índice de Tenacidad (IT), la mezcla a 20 °C con un porcentaje de betún del 5,5% es la única que coge el grado de excelencia. Las otras mezclas no descalificadas, se encuentran: la de 5,5 % a 5 °C calificada como buena, y las otras dos ensayadas a 5 °C como adecuadas a causa de sus dispersiones.

Para acabar de hacer un análisis completo, miramos el mismo parámetro GF con el Desplazamiento al 50 % de la carga post-pico y las mezclas obtienen esta disposición.

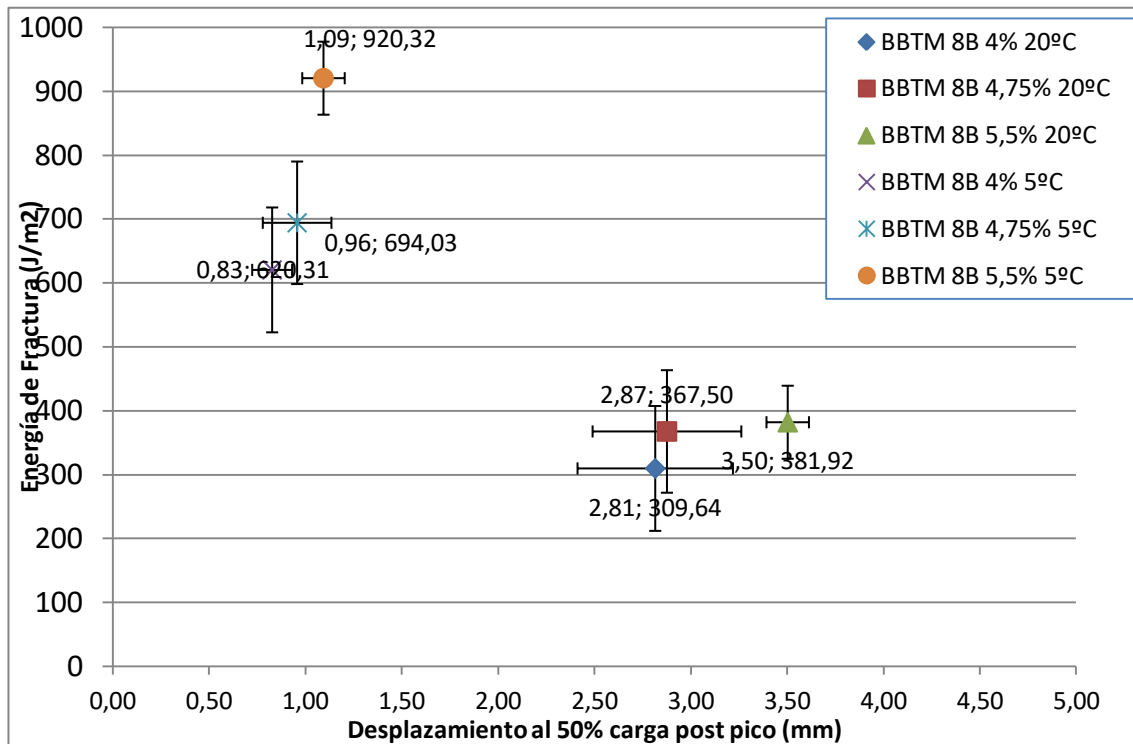


Figura 4.13: Energía de fractura – Desplazamiento al 50 % carga post-pico.

Aquí, las mezclas ya se pueden visualizar mejor por temperaturas. Se ve que tienen muy poco desplazamiento a 5 °C y en cambio, un desplazamiento considerable a 20 °C. Las tendencias son las mismas que en el último gráfico, parecen exponencial y logarítmica. Al imponer los límites de GF y los de d0,5Pm, podremos determinar cuáles van a ser la mezcla o las mezclas que van a asegurar una mayor rigidez y deformación.

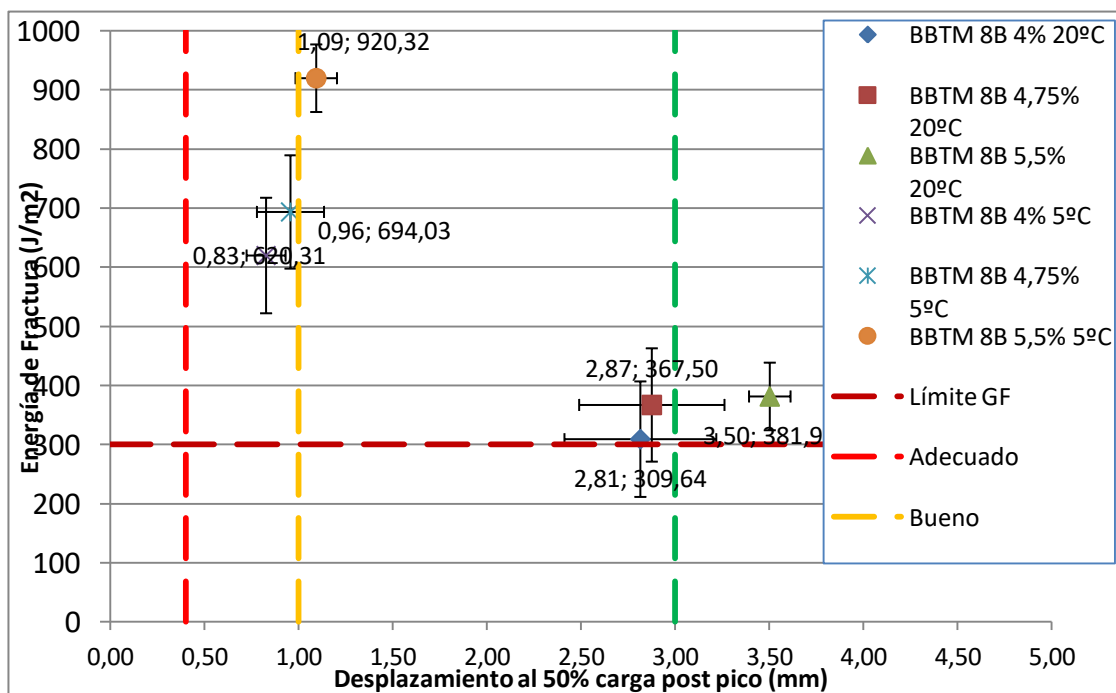


Figura 4.14: Energía de fractura – Desplazamiento al 50 % de la carga post-pico.

Las mezclas de 4 y 4,75 % a 20 °C, vuelven a encontrarse por debajo del límite de GF. En cambio, todas las otras mezclas quedan por encima.

Al fijarnos con los límites de desplazamiento al 50% de la carga post-pico, encontramos a la mezcla de 5,5 % de betún ensayada a 20 °C como la única con grado de excelencia, la 5,5 % de betún ensayada a 5 °C con una calificación de buena, y las otras dos mezclas a 5 °C, como adecuadas.

4.5.3 Resumen de valores óptimos

Para acabar el análisis que se ha realizado en este capítulo, se va a resumir todos los rangos recomendados.

Se recogen a continuación una serie de valores límites en función de los parámetros estudiados para conseguir propiedades adecuadas (mínimas), buenas o excelentes de ductilidad y mínima rigidez admisible.

Parámetros	Adeuada (%)	Buena (%)	Excelente (%)	Mínimo (%)
IT	≥ 4	$\geq 4,75$		
IRT				$< 5,5$
GF				$> 4,75$
d0,5 Pm	≥ 4	$> 5,5$		

Tabla 4.4: Resumen de los valores óptimos según los parámetros estudiados

En conclusión, el rango recomendado para cumplir con todos los parámetros estudiados simultáneamente está entre 4,75% y 5.5%. Asegurando un nivel de ductilidad bueno, siendo la rigidez el parámetro restrictivo.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

En este capítulo se van a describir todas las conclusiones obtenidas después de realizar el ensayo Fénix y haber aplicado unos tests estadísticos para poder asegurar la sensibilidad del ensayo en cuestión.

5.1 Ensayo de densidades

En primer lugar, el ensayo de densidades indica que el contenido de ligante es muy importante en las mezclas BBTM ya que según el tanto por ciento que se fabrique una probeta, sale mayor o menor cantidad de huecos en tanto por ciento. La primera conclusión es que no es proporcional la disminución del contenido de betún, con el incremento de huecos. Sino que cada contenido de betún obtiene un contenido de huecos, siendo todos los contenidos representativos.

Otra conclusión que se llega al hacer el ensayo de densidades, es que no todos los contenidos de betún son válidos a la hora de la fabricación de probetas, sino que hay unos límites establecidos en el pliego. Según el contenido de betún que se ponga, cumplirá o no. En este trabajo, dos de los contenidos de betún cumplen, pero el 4% de contenido de betún queda fuera de los límites establecidos (12 a 18% de huecos).

Esta última serie, la del 4 %, tampoco cumple con el contenido mínimo de betún especificado, del 4,75 %, pero se ha incluido en el estudio para observar las tendencias de los parámetros analizados al variar el contenido de betún con valores menguantes y crecientes.

5.2 Ensayo Fénix

Al realizar el ensayo Fénix, se puede obtener más conclusiones tanto de sensibilidad como de contenidos de betún óptimos para el diseño de una mezcla bituminosa resistente a la deformación, y por lo tanto, alargar la vida útil de cualquier infraestructura vial sin tener que realizar muchas actividades de mantenimiento o conservación. Siempre teniendo en cuenta que el PG-3 exige más ensayos no estudiados en este trabajo de final de grado. Pero si se puede indicar para este ensayo, cuál es el rango óptimo de contenido de betún.

A 5 °C todos los parámetros de rigidez son más altos en todos los contenidos de betún. Al mirar los parámetros de deformación, los contenidos de betún a 20°C presentan mayor ductilidad. Los grupos con diferentes contenidos de betún son estadísticamente diferentes después de realizar los tests estadísticos. Así pues, el ensayo Fénix presenta una gran sensibilidad tanto con el cambio del contenido de betún de cada grupo de probetas, como con las distintas temperaturas.

Al comparar los parámetros de rigidez con los de deformación usando los criterios establecidos para el uso del ensayo Fénix, obtenemos que los parámetros de rigidez, son los que restringen el mínimo contenido de betún. Esta conclusión, la podemos hacer ya que la ductilidad de todas las series de cada contenido de betún es adecuada o buena, en cambio, al referenciarlos en los parámetros de rigidez, sólo dos contenidos de betún cumplen todos los parámetros especificados. El contenido de betún que ya no cumplía los límites del contenido de huecos, el 4 % de betún, tampoco cumple en todos estos parámetros, ya sea por la media obtenida de las 16 probetas o por la desviación estándar que la define.

De esta forma, podemos acabar este trabajo de final de grado, asegurando que el ensayo Fénix es un ensayo fiable para los parámetros que se han ido variando. Así pues, es un ensayo que muestra sensibilidad y que permite definir un rango del contenido de betún en el que la mezcla se comportará adecuadamente.

Finalmente, se puede afirmar que se ha alcanzado el objetivo principal por la cual este trabajo ha sido realizado. **El ensayo Fénix es un ensayo sensible al cambio del contenido de betún para una mezcla BBTM8B** y también, permite analizar ciertos parámetros que en otros ensayos no se tienen en cuenta, dejando a éste, como un ensayo muy adecuado a la hora de hacer un estudio experimental para tener conocimiento del comportamiento frente a la fisuración de las mezclas BBTM a 5 y a 20°C.

Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

{1} Pérez-Jiménez, F. Productos Asfálticos Cepsa, S.S. (PROAS). Vademécum de pavimentación. CEPSA, Tu mundo, más eficiente. 12ª Edición mayo 2017, pp. 65-85.

{2} Andreu M. Aplicación del ensayo Fénix al diseño de una Mezcla Bituminosa Semidensa. Efecto del tipo de betún. Tesis, 2015.

{3} Kennedy, Thomas W., Characterization of asphalt pavement materials using the indirect tensile test. Proceeding Association of Asphalt Paving Technical Sessions, Sant Antonio, Texas, Volumen 46, The Association of Asphalt Paving Technologists.

- {4} Molenaar A, A. Scarpas, X. Liu and S. Erkens, Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful?. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 795-815, 2002.
- {5} Wagoner M., W. Buttlar and G- Paulino. Disk-shaped Compact Tension Test for Asphalt Concrete Fracture, Experimental Mechanics, Vol. 45, Nº3. pp 270-277, 2005.
- {6} Pérez F., R. Miró, A. Martínez Assessment of the adhesive capacity of asphalt binders in the aggregate-binder bonds by means of new methodology. Revista de la Construcción vol. 14 no. 1, Santiago de Chile, 2015.
- {7} Pérez, F.; Miró, R. Nuevos ensayos para la caracterización de ligantes y mezclas asfálticas. Carreteras, 2002, no. 122 p. 28.
- {8} Marcela L., Reyes, O.J., Camacho, H. F. Universidad Militar nueva Granada – Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Diciembre de 2013. Vol. 23-2. Comportamiento de mezclas asfálticas cerradas mediante la aplicación del ensayo Fénix.
- {9} Levene, Howard (1960). Stanford University Press. Ingram Olkin, Harold Hotelling, et alia, ed. Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. pp. 278-292.
- {10} Delgado Sánchez-Mateos, J. Universidad de Salamanca.–Algunos problemas básicos del Análisis de Varianzas. 1992. Pp 113-114.
- {11} Declaraciones de prestaciones (Sorigué). No DdP09-2004TO/4ASF.CUM.
- {12} Asensio Sánchez, I. Evaluación de la resistencia a la fisuración a bajas temperaturas mediante la aplicación del ensayo Fénix. Tesis, 2011.
- {13} AENOR Depósito legal: M 54215:2007. Norma española UNE-EN 12697-5:2002+A1:2007, Diciembre 2007.
- {14} AENOR Depósito legal: M 46922:2003. Norma española UNE-EN 12697-8, Noviembre 2003.

Otra Bibliografía:

Boletín Oficial del Estado. Artículo 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas.

Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. 2004
FOM/891/2004

Norma 6.1 – IC Secciones de firmes – Definiciones

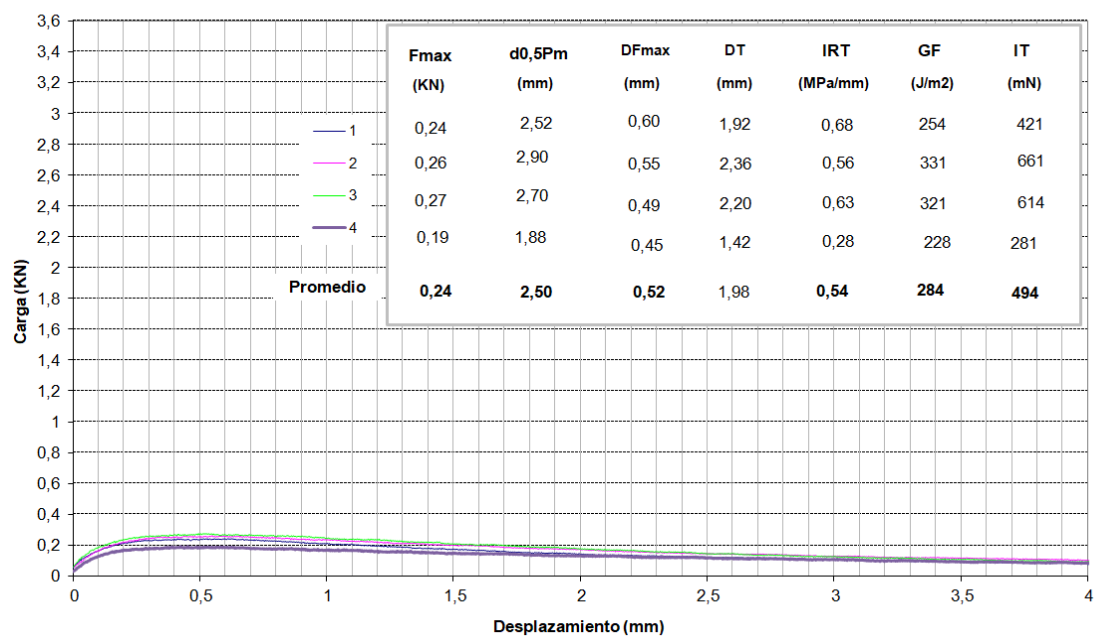
ANEJOS

ANEJO 1:

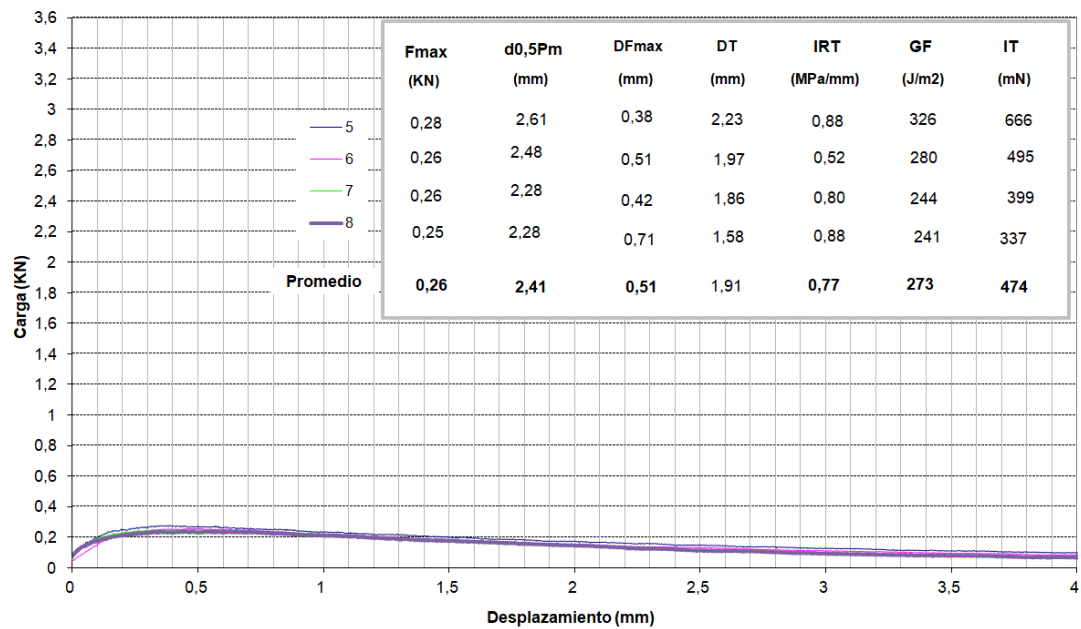
Datos experimentales extraídos del ensayo Fénix (Gráficas).

➤ 4% de contenido de betún a 20 °C:

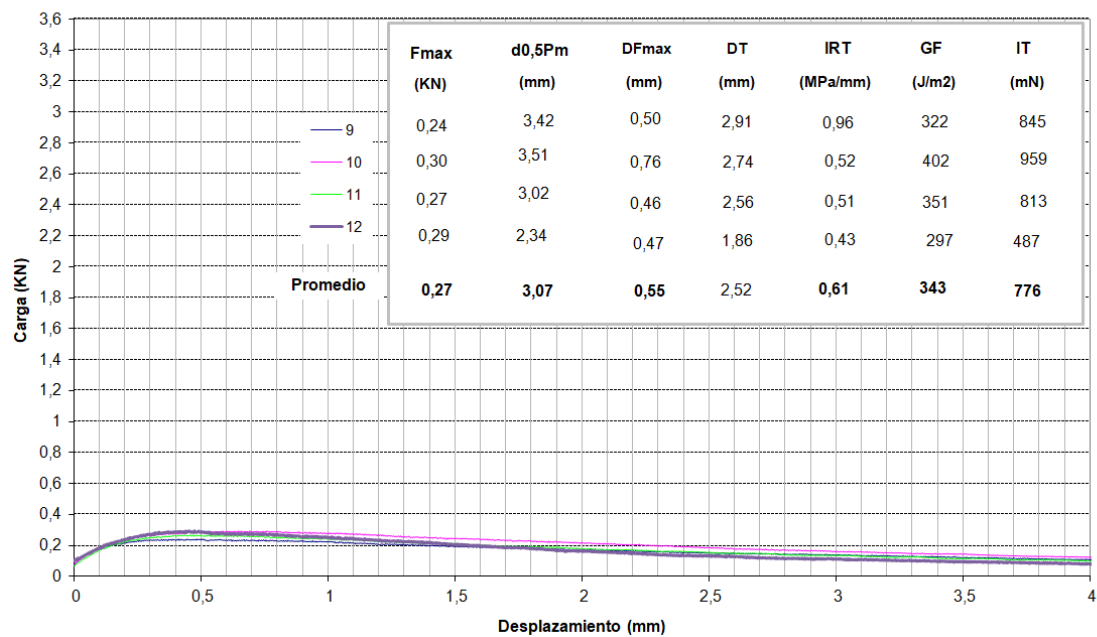
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4%



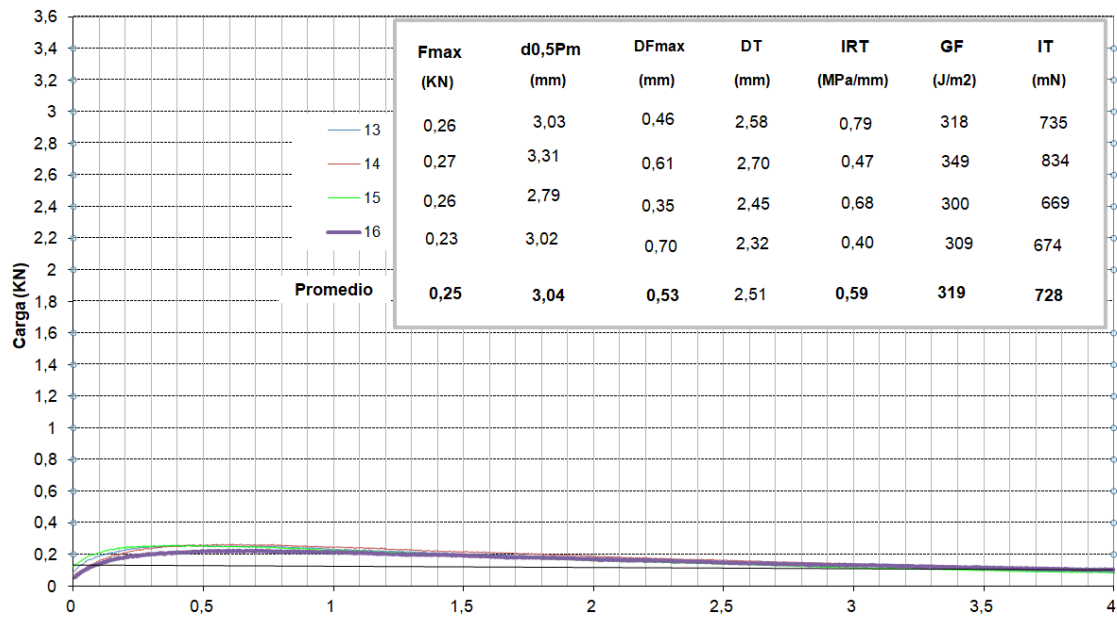
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4%

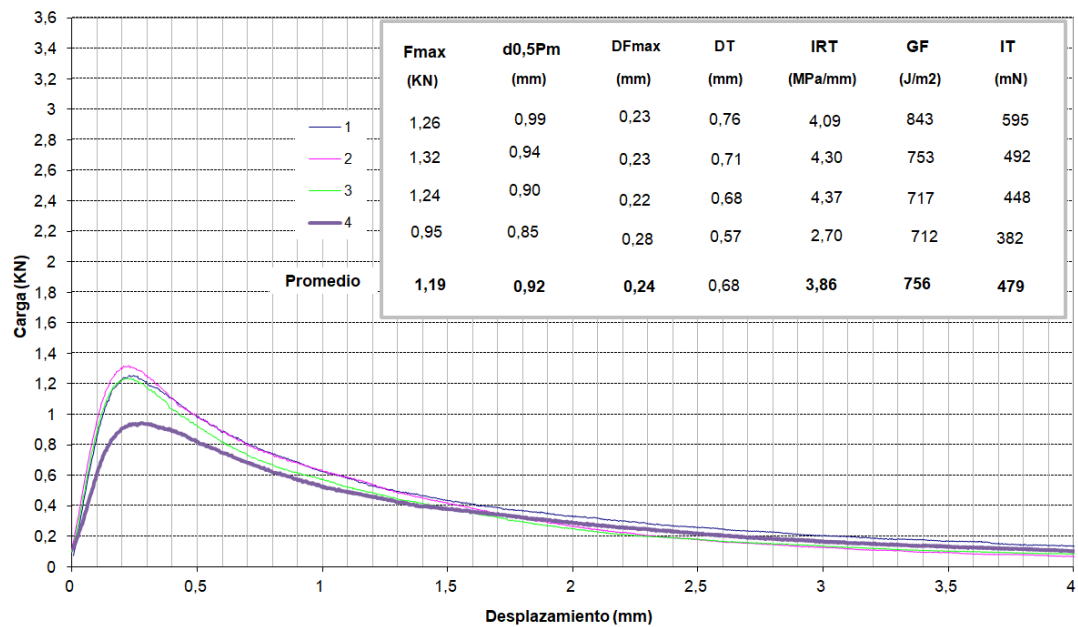


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4%

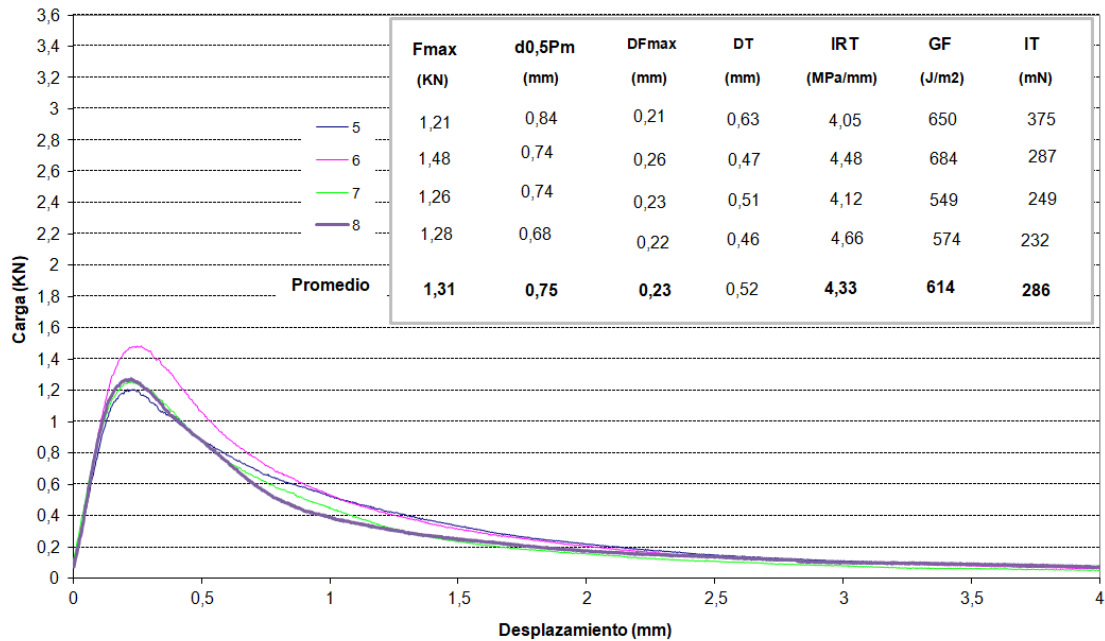


➤ 4% de contenido de betún a 5 °C:

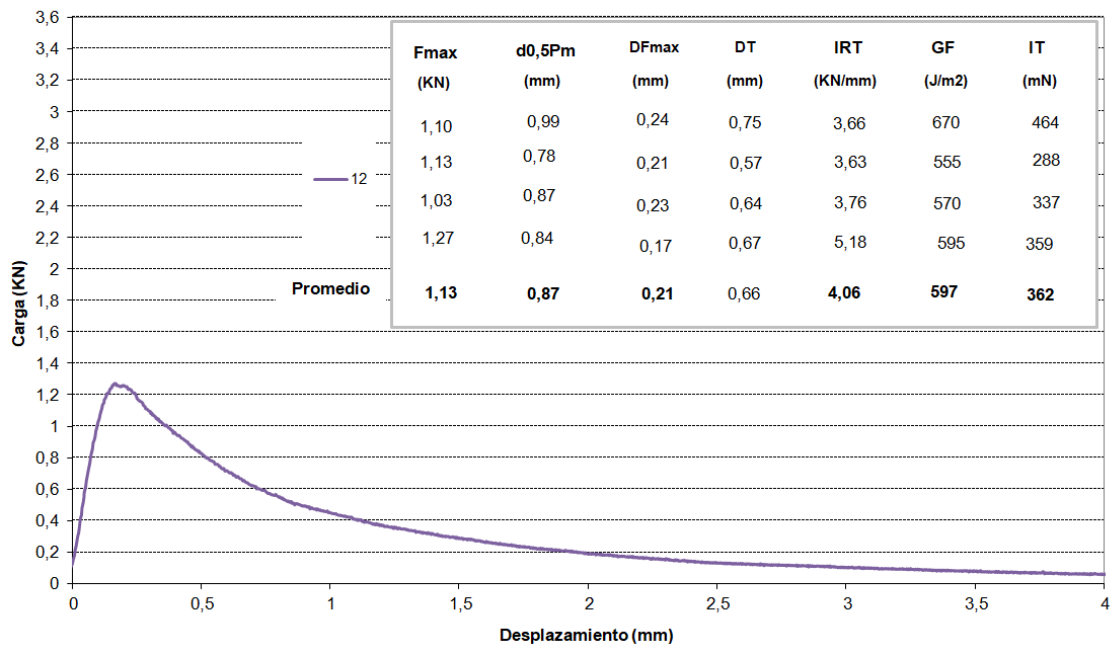
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4%



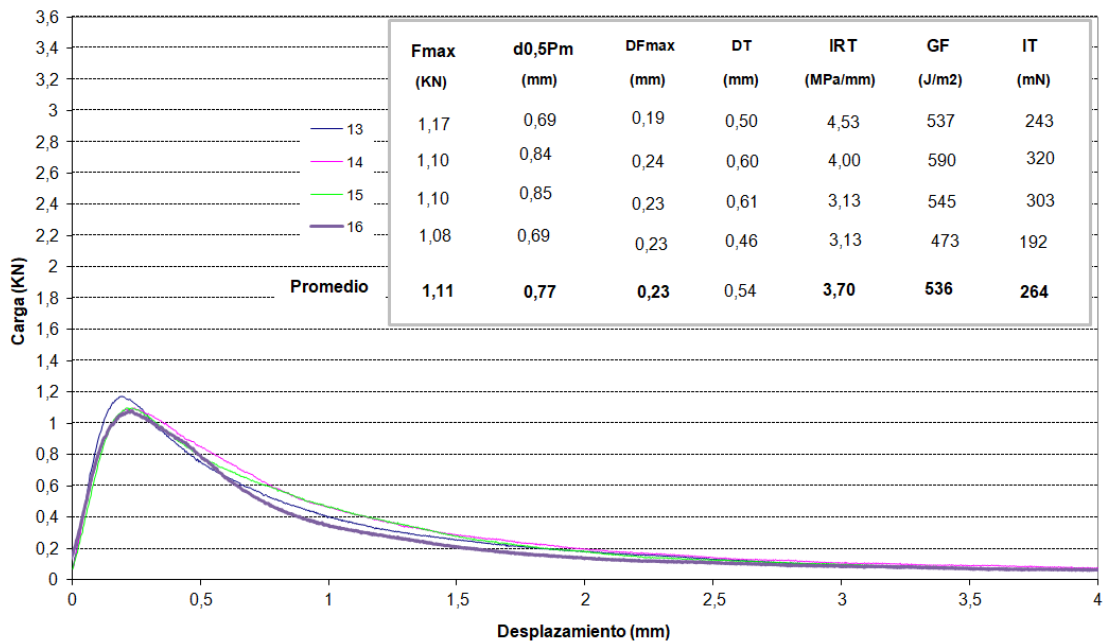
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4%

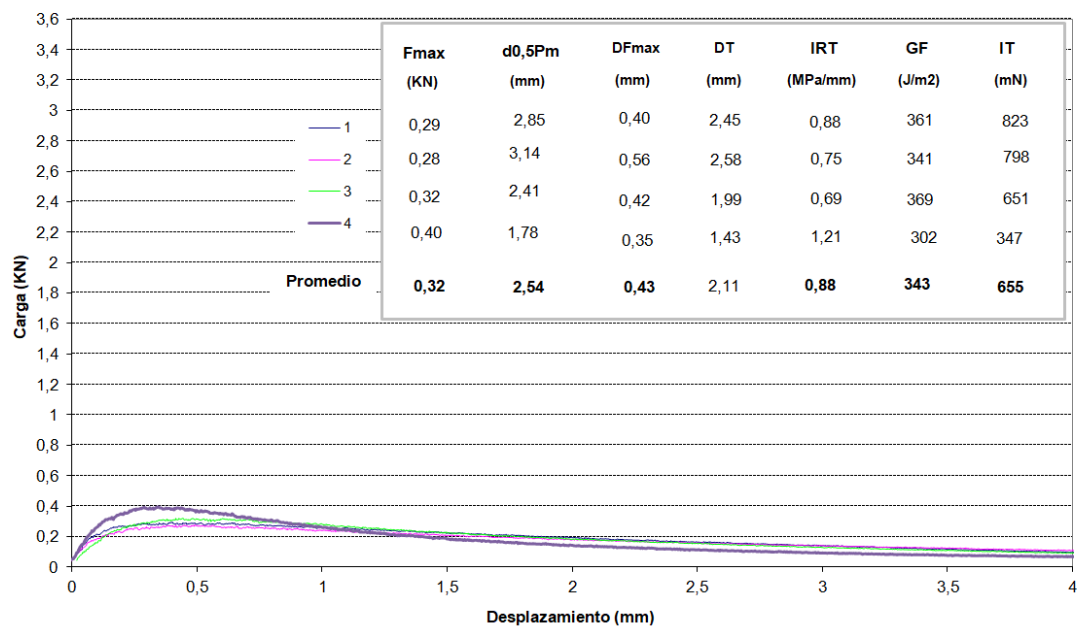


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4%

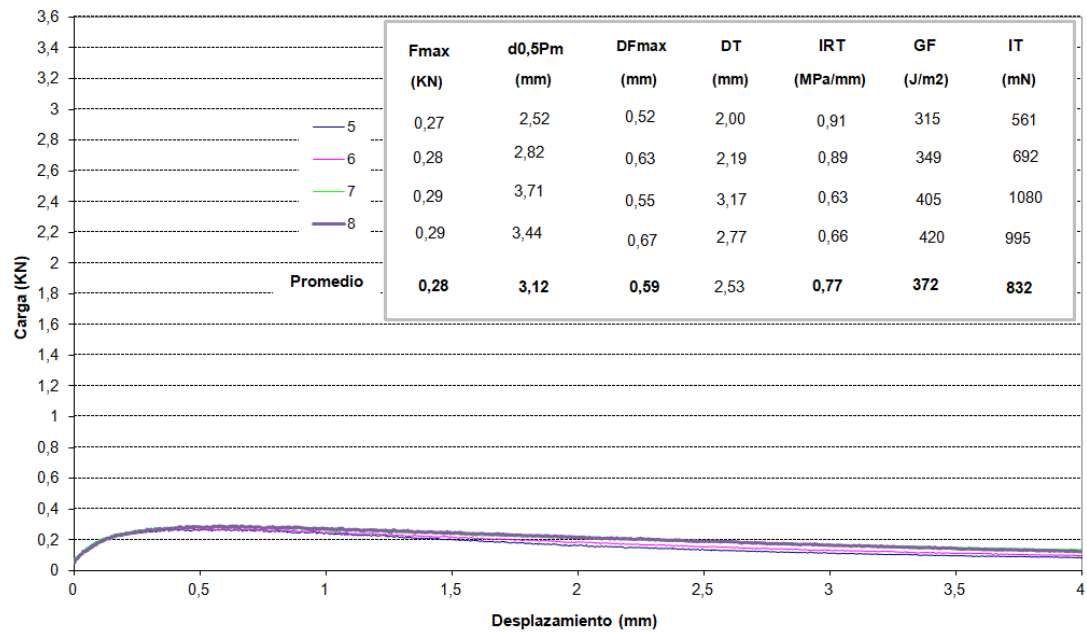


➤ 4,75 % de contenido de betún a 20 °C:

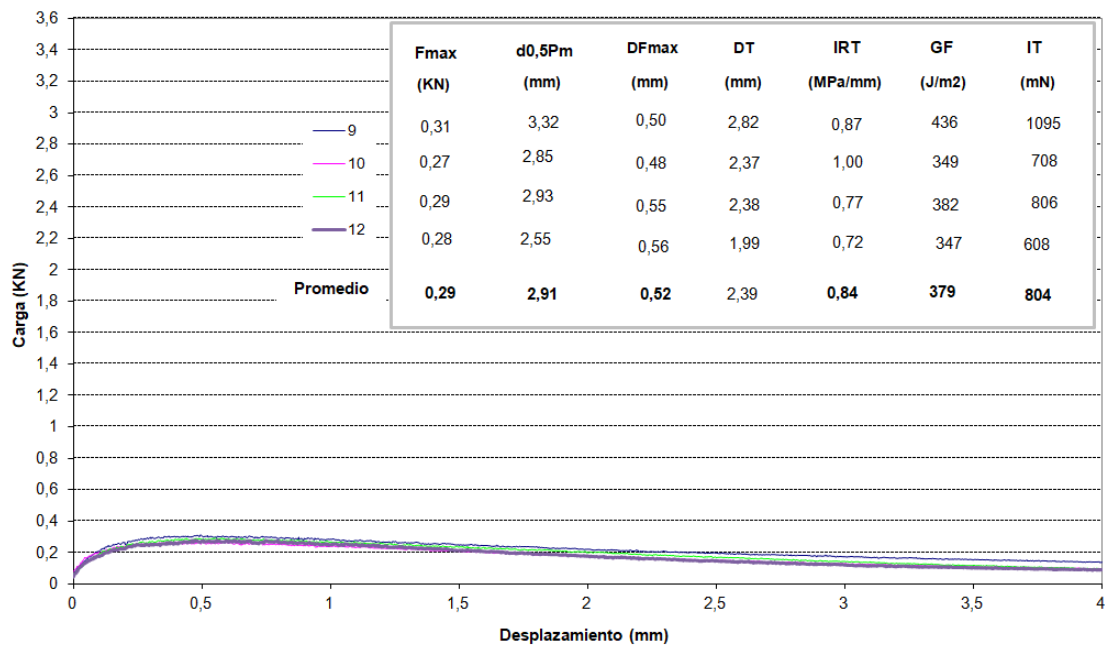
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4,75%



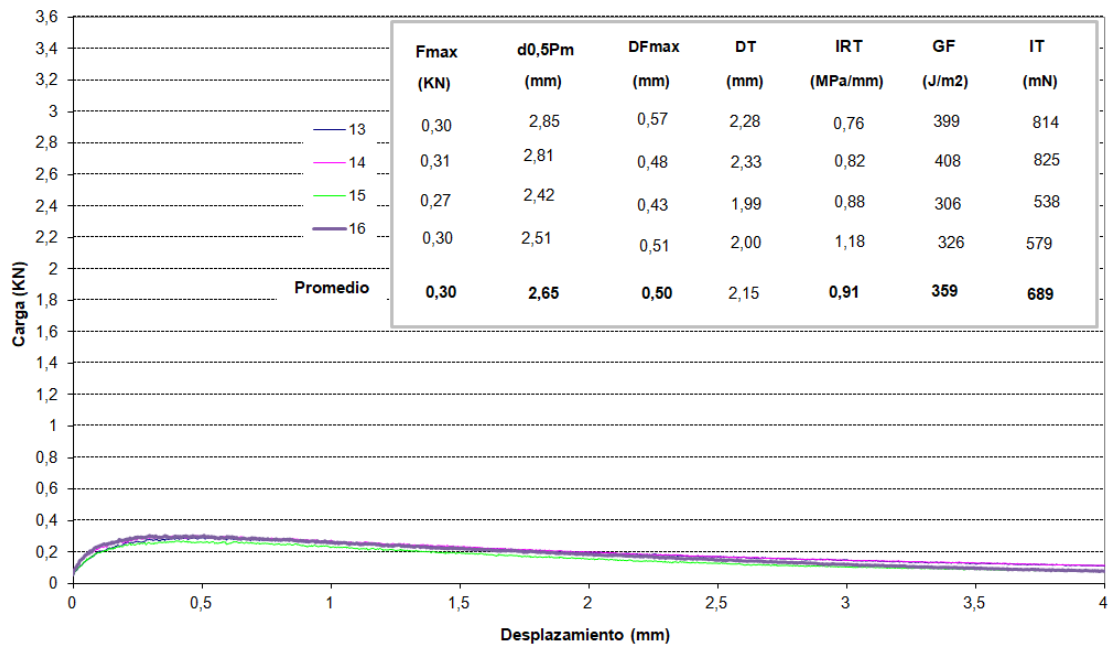
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4,75%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4,75%

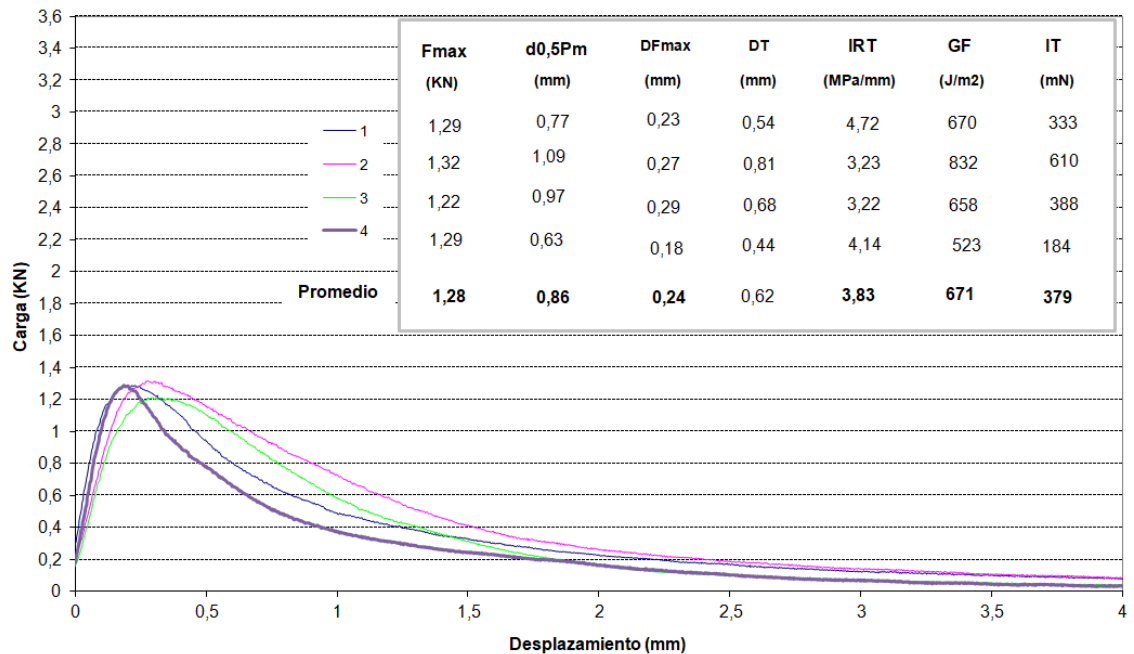


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 4,75%

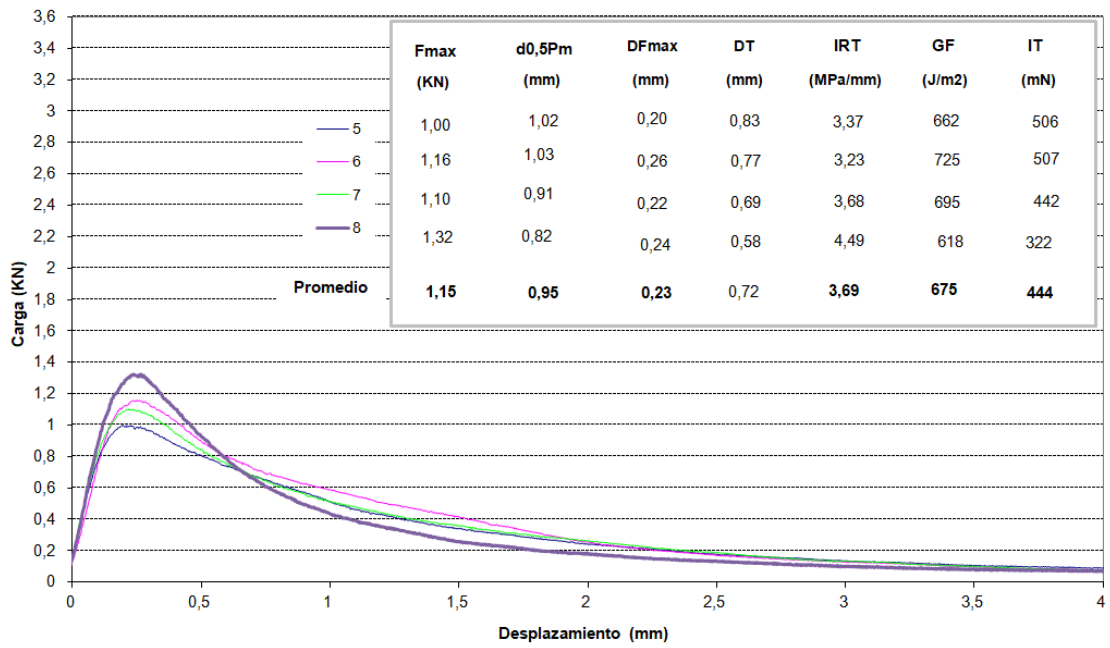


➤ 4,75 % de contenido de betún a 5 °C:

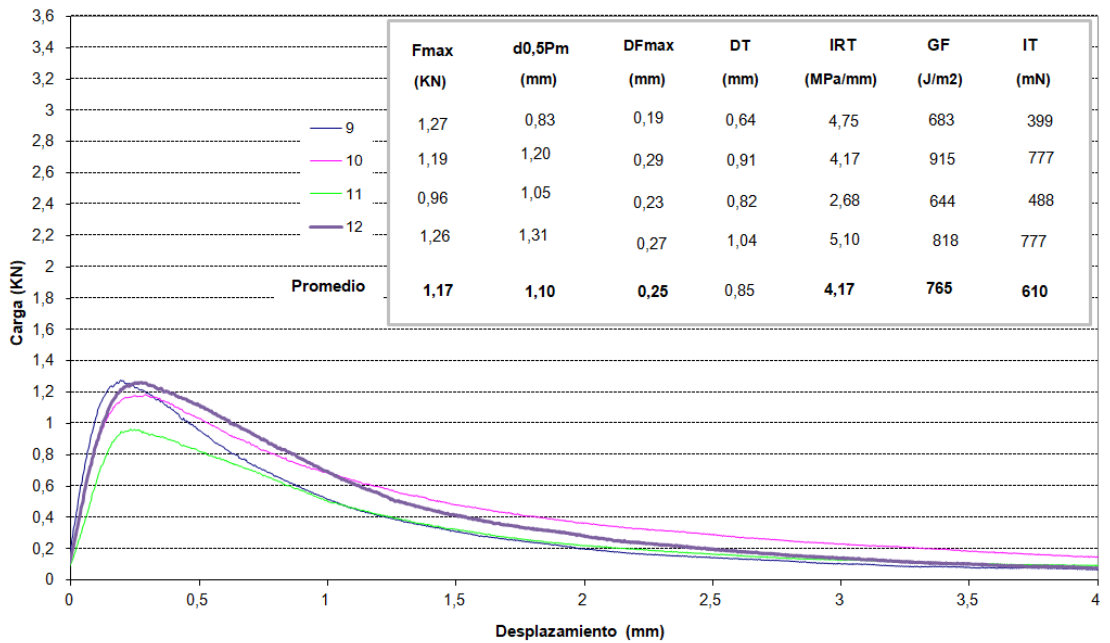
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4,75%



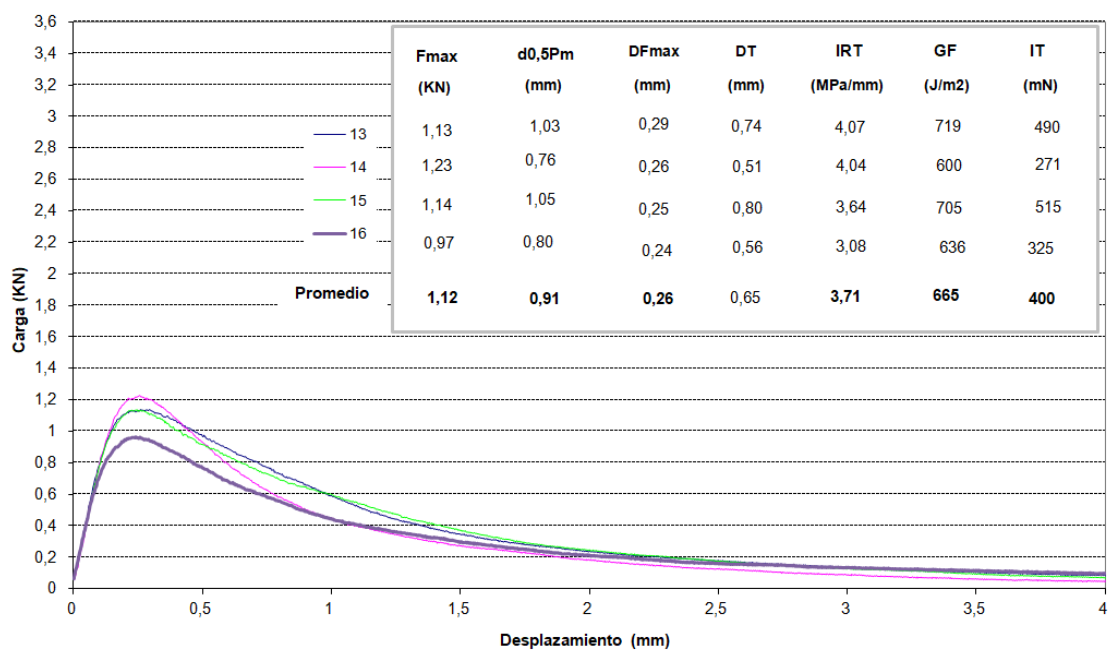
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4,75%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4,75%

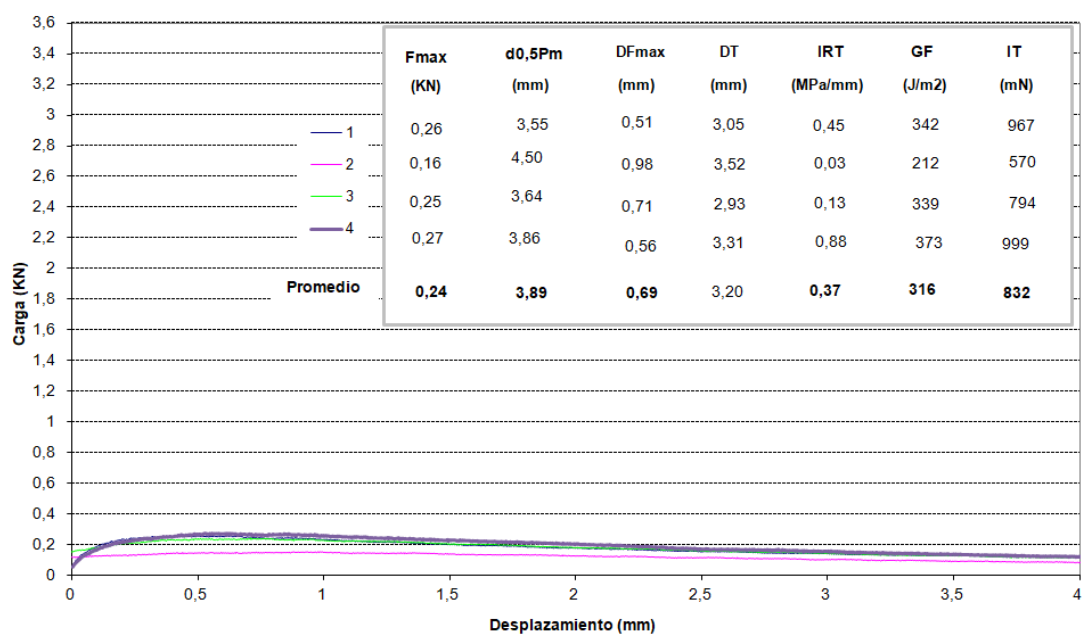


Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 4,75%

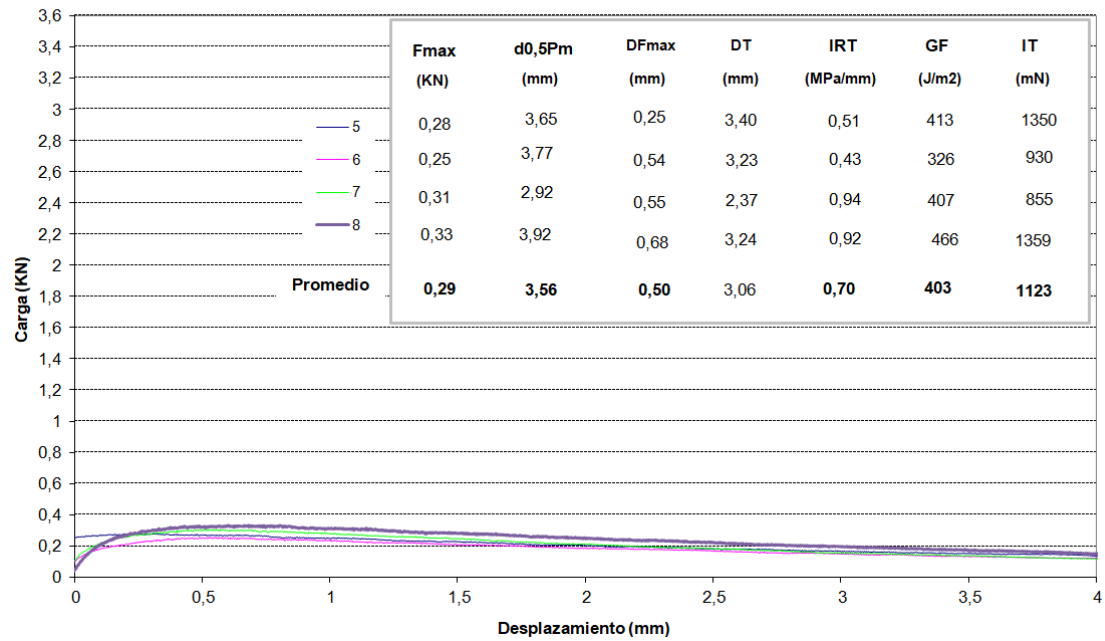


➤ 5,5 % de contenido de betún a 20 °C:

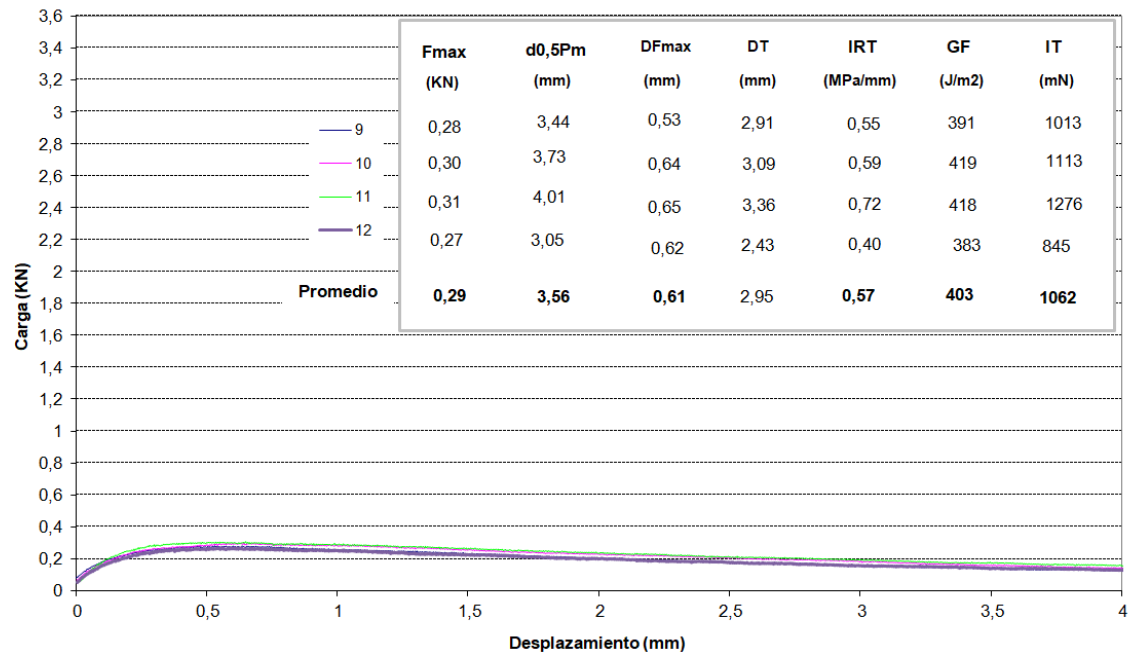
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 5,5%



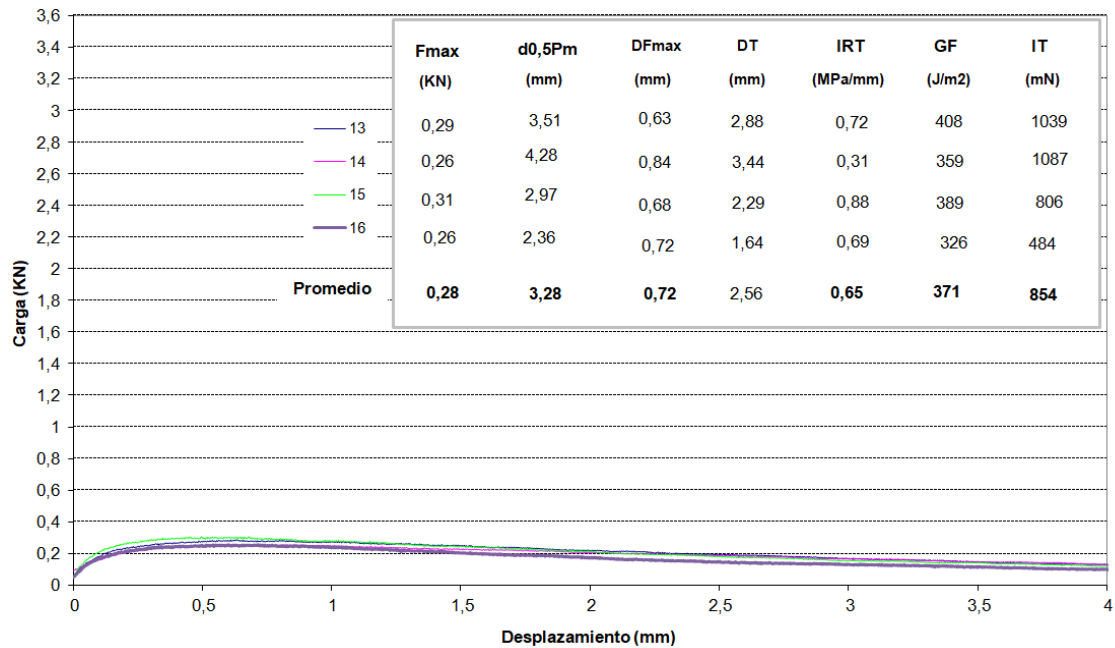
Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 5,5%



Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 5,5%

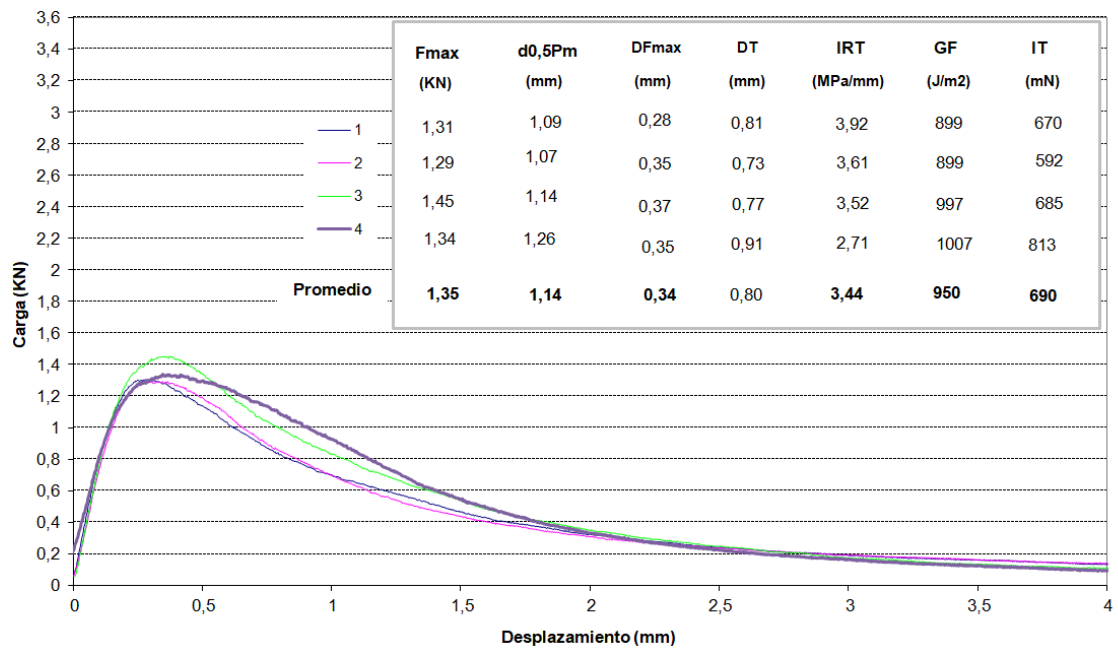


Ensayo Fénix a 20°C y 1 mm/min. 5,5%

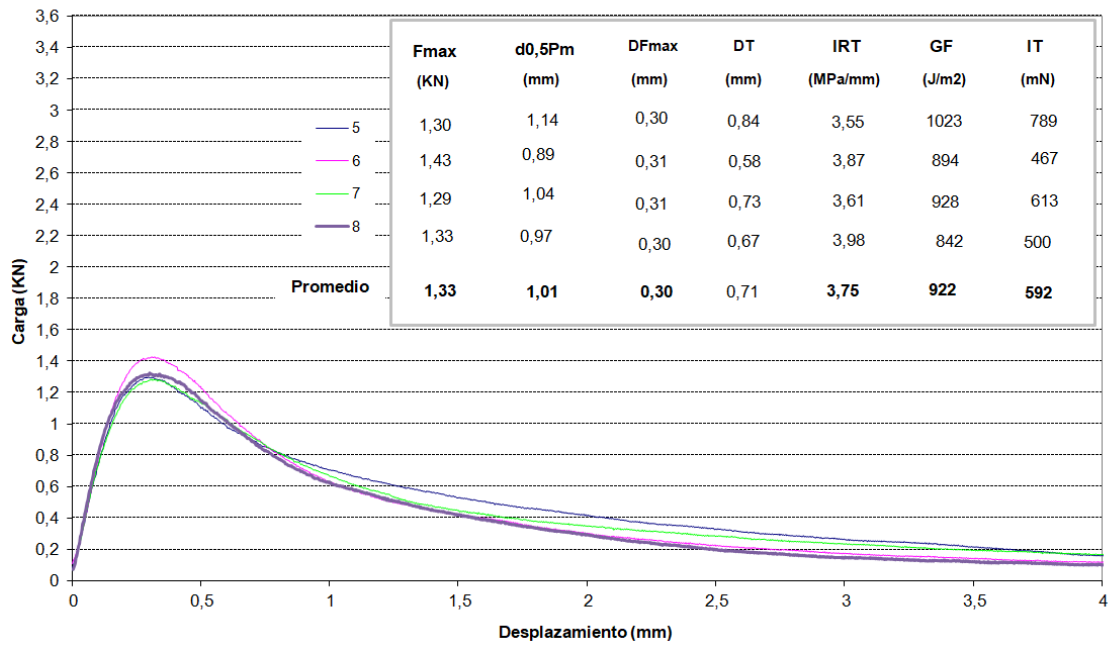


➤ 5,5 % de contenido de betún a 20 °C:

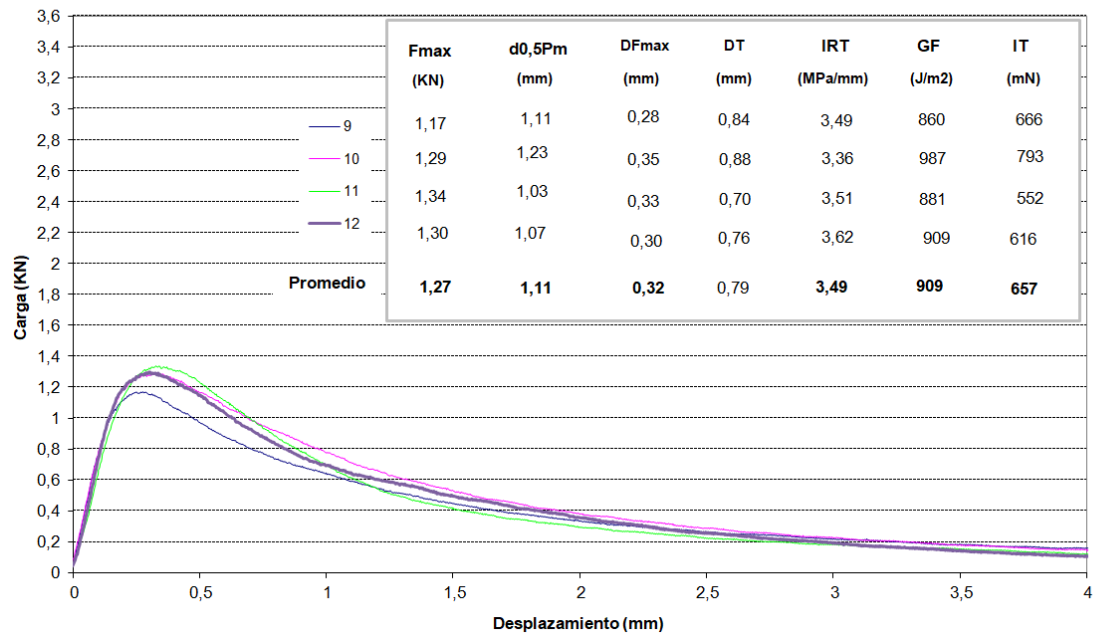
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 5,5%



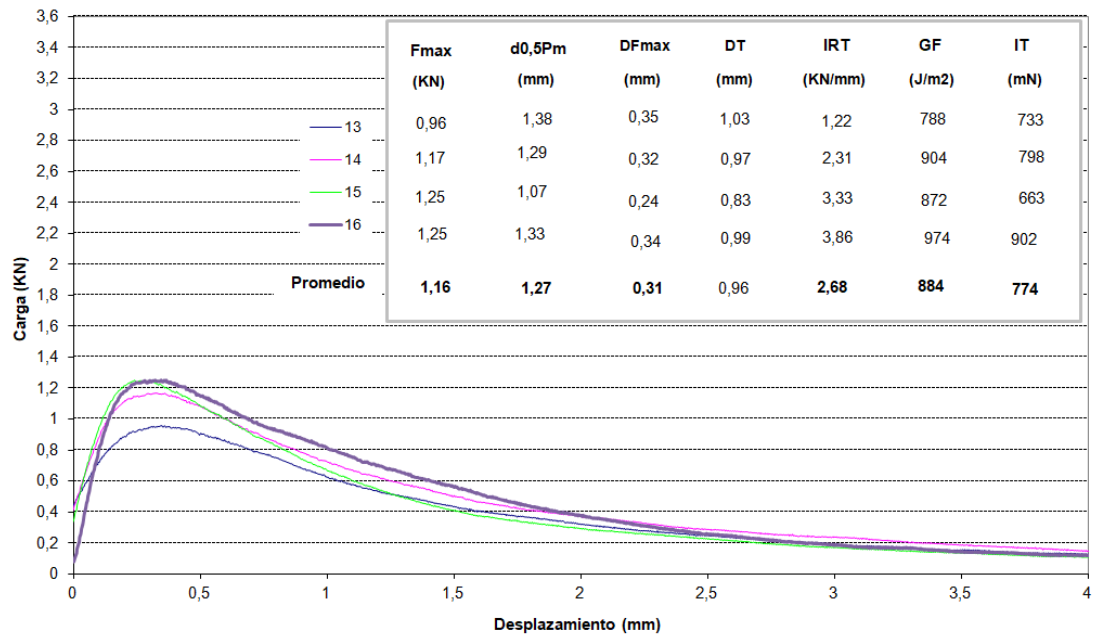
Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 5,5%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 5,5%



Ensayo Fénix a 5°C y 1 mm/min. 5,5%



Datos experimentales extraídos del ensayo Fénix (Tablas resumen).

➤ 4 % de contenido de betún a 20 °C

Probeta		Huecos (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resist. a Tracción RT (Mpa)	Desp. a Fmax DFmax (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		22,58	0,24	0,12	0,60	0,68	254	421	2,52
2		21,42	0,26	0,13	0,55	0,56	331	661	2,90
3		21,20	0,27	0,13	0,49	0,63	321	614	2,70
5		20,53	0,28	0,13	0,38	0,88	326	666	2,61
6		20,54	0,26	0,13	0,51	0,52	280	495	2,48
7		20,57	0,26	0,12	0,42	0,80	244	399	2,28
8		20,20	0,25	0,12	0,71	0,88	241	337	2,28
9		21,75	0,24	0,11	0,50	0,96	322	845	3,42
10		21,55	0,30	0,14	0,76	0,52	402	959	3,51
11		21,12	0,27	0,13	0,46	0,51	351	813	3,02
12		20,69	0,29	0,14	0,47	0,43	297	487	2,34
13		20,59	0,26	0,13	0,46	0,79	318	735	3,03
14		21,05	0,27	0,13	0,61	0,47	349	834	3,31
15		21,23	0,26	0,12	0,35	0,68	300	669	2,79
16		21,63	0,23	0,11	0,70	0,40	309	674	3,02
Media		21,11	0,26	0,13	0,53	0,65	309,64	640,54	2,81
Desvest (Sr)		0,62	0,02	0,01	0,12	0,18	43,13	182,64	0,40
COV (%)		2,94	7,12	7,30	22,95	27,76	13,93	28,51	14,33
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	20,77	0,25	0,12	0,46	0,55	285,76	539,40	2,59
	Int. Sup. M	21,45	0,27	0,13	0,60	0,75	333,52	741,68	3,04
Límite de repetibilidad (r)		1,74	0,05	0,03	0,34	0,50	120,76	511,39	1,13

➤ 4 % de contenido de betún a 5 °C

Probeta		Huecos (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resist. a Tracción RT (Mpa)	Desp. a Fmax DFmax (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		22,58	1,26	0,60	0,23	4,09	843	595	0,99
2		21,42	1,32	0,63	0,23	4,30	753	492	0,94
3		21,20	1,24	0,59	0,22	4,37	717	448	0,90
5		20,53	1,21	0,58	0,21	4,05	650	375	0,84
6		20,54	1,48	0,71	0,26	4,48	684	287	0,74
7		20,57	1,26	0,60	0,23	4,12	549	249	0,74
8		20,20	1,28	0,62	0,22	4,66	574	232	0,68
9		21,75	1,10	0,52	0,24	3,66	670	464	0,99
10		21,55	1,13	0,54	0,21	3,63	555	288	0,78
11		21,12	1,03	0,51	0,23	3,76	570	337	0,87
12		20,69	1,27	0,61	0,17	5,18	595	359	0,84
13		20,59	1,17	0,57	0,19	4,53	537	243	0,69
14		21,05	1,10	0,53	0,24	4,00	590	320	0,84
15		21,23	1,10	0,52	0,23	3,13	545	303	0,85
16		21,63	1,08	0,51	0,23	3,13	473	192	0,69
Media		21,11	1,20	0,58	0,22	4,07	620,31	345,64	0,83
Desvest (Sr)		0,62	0,12	0,06	0,02	0,56	97,71	111,76	0,10
COV (%)		2,94	9,78	9,75	10,00	13,64	15,75	32,33	12,54
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	20,77	1,14	0,54	0,21	3,77	566,20	283,75	0,74
	Int. Sup. M	21,45	1,27	0,61	0,24	4,38	674,42	407,53	0,88
Límite de repetibilidad (r)		1,74	0,33	0,16	0,06	1,56	273,58	312,92	0,29

➤ 4,75 % de contenido de betún a 20 °C

Probeta		Huecos (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resist. a Tracción RT (Mpa)	Desp. a Fmax DFmax (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		15,91	0,29	0,14	0,40	0,88	361,49	823,24	2,85
2		15,47	0,28	0,13	0,56	0,75	341,44	797,72	3,14
3		15,76	0,32	0,16	0,42	0,69	368,80	651,07	2,41
5		15,31	0,27	0,13	0,52	0,91	315,16	561,23	2,52
6		16,05	0,28	0,14	0,63	0,89	348,88	692,29	2,82
7		15,89	0,29	0,15	0,55	0,63	404,57	1079,89	3,71
8		14,84	0,29	0,15	0,67	0,66	419,86	994,80	3,44
9		15,13	0,31	0,16	0,50	0,87	436,40	1095,12	3,32
10		16,00	0,27	0,13	0,48	1,00	349,14	708,15	2,85
11		16,25	0,29	0,15	0,55	0,77	382,45	805,81	2,93
12		14,94	0,28	0,14	0,56	0,72	346,64	608,27	2,55
13		14,81	0,30	0,15	0,57	0,76	398,53	813,69	2,85
14		15,65	0,31	0,15	0,48	0,82	407,60	825,04	2,81
15		15,24	0,27	0,14	0,43	0,88	305,67	538,36	2,42
16		15,33	0,30	0,14	0,51	1,18	325,93	579,21	2,51
Media		15,50	0,29	0,14	0,52	0,83	367,50	771,59	2,87
Desvest (Sr)		0,47	0,02	0,01	0,07	0,14	39,45	178,46	0,39
COV (%)		3,00	5,27	5,95	14,38	17,14	10,73	23,13	13,43
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	15,25	0,28	0,14	0,48	0,75	345,66	672,77	2,66
	Int. Sup. M	15,76	0,30	0,15	0,56	0,91	389,35	870,42	3,09
Límite de repetibilidad (r)		1,30	0,04	0,02	0,21	0,40	110,45	499,68	1,08

➤ 4,75 % de contenido de betún a 5 °C

Probeta		Huecos	Carga Máxima	Resist. a Tracción	Desp. a Fmax	Índice Rigidez a Tracción	Energía de Fractura	Índice de Tenacidad	Despl. al 50% carga postp
		(%)	Fmax (KN)	RT (Mpa)	DFmax (mm)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m2)	IT (mN)	d0,5Pm (mm)
1		15,91	1,29	0,60	0,23	4,72	670,36	333,14	0,77
2		15,47	1,32	0,64	0,27	3,23	832,26	610,08	1,09
3		15,76	1,22	0,61	0,29	3,22	658,38	387,79	0,97
4		16,40	1,29	0,62	0,18	4,14	523,07	184,15	0,63
5		15,31	1,00	0,49	0,20	3,37	662,48	506,39	1,02
6		16,05	1,16	0,58	0,26	3,23	725,36	506,72	1,03
7		15,89	1,10	0,56	0,22	3,68	695,46	442,49	0,91
8		14,84	1,32	0,65	0,24	4,49	618,04	321,82	0,82
9		15,13	1,27	0,64	0,19	4,75	682,92	399,49	0,83
10		16,00	1,19	0,58	0,29	4,17	915,45	777,02	1,20
11		16,25	0,96	0,48	0,23	2,68	643,65	487,91	1,05
12		14,94	1,26	0,62	0,27	5,10	817,79	777,49	1,31
13		14,81	1,13	0,56	0,29	4,07	718,51	490,25	1,03
14		15,65	1,23	0,61	0,26	4,04	599,69	270,82	0,76
15		15,24	1,14	0,56	0,25	3,64	704,74	515,47	1,05
16		15,3	0,97	0,49	0,24	3,08	636,33	325,18	0,80
Media		15,56	1,18	0,58	0,25	3,85	694,03	458,51	0,96
Desvest (Sr)		0,50	0,12	0,06	0,03	0,69	95,87	164,79	0,18
COV (%)		3,23	10,21	9,64	14,23	18,02	13,81	35,94	18,65
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	15,29	1,11	0,55	0,23	3,48	642,94	370,70	0,86
Límite de repetibilidad (r)	Int. Sup. M	15,63	1,24	0,61	0,26	4,22	745,11	546,32	1,05
		1,41	0,34	0,16	0,10	1,94	268,44	461,40	0,50

➤ 5,5 % de contenido de betún a 20 °C

Probeta		Huecos (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resist. a Tracción RT (Mpa)	Desp. a Fmax DFmax (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		17,03	0,26	0,12	0,51	0,45	342,00	966,76	3,55
3		15,55	0,25	0,12	0,71	0,13	339,23	793,97	3,64
4		15,30	0,27	0,13	0,56	0,88	372,50	998,78	3,86
6		15,10	0,25	0,12	0,54	0,43	326,36	929,93	3,77
7		15,51	0,31	0,15	0,55	0,94	407,24	854,56	2,92
8		15,69	0,33	0,16	0,68	0,92	466,10	1359,04	3,92
9		15,27	0,28	0,14	0,53	0,55	391,36	1013,47	3,44
10		15,13	0,30	0,15	0,64	0,59	419,28	1113,14	3,73
11		15,60	0,31	0,15	0,65	0,72	418,15	1276,05	4,01
12		15,61	0,27	0,13	0,62	0,40	382,58	845,26	3,05
13		15,46	0,29	0,14	0,63	0,72	407,62	1038,87	3,51
14		15,97	0,26	0,12	0,84	0,31	359,20	1087,36	4,28
15		15,05	0,31	0,15	0,68	0,88	389,17	805,56	2,97
16		16,59	0,26	0,12	0,72	0,69	326,06	484,27	2,36
Media		15,63	0,28	0,14	0,63	0,62	381,92	969,07	3,50
Desvest (Sr)		0,57	0,03	0,01	0,09	0,25	40,63	216,83	0,52
COV (%)		3,62	9,26	9,67	14,50	40,40	10,64	22,37	14,71
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	15,31	0,27	0,13	0,58	0,47	358,46	843,88	3,20
	Int. Sup. M	15,96	0,30	0,14	0,69	0,76	405,38	1094,27	3,80
Límite de repetibilidad (r)		1,58	0,07	0,04	0,26	0,70	113,78	607,12	1,44

➤ 5,5 % de contenido de betún a 5 °C

Probeta		Huecos (%)	Carga Máxima Fmax (KN)	Resist. a Tracción RT (Mpa)	Desp. a Fmax DFmax (mm)	Índice Rigidez a Tracción IRT (MPa/mm)	Energía de Fractura GF (J/m2)	Índice de Tenacidad IT (mN)	Despl. al 50% carga postp d0,5Pm (mm)
1		17,03	1,31	0,63	0,28	3,92	898,59	669,64	1,09
2		16,60	1,29	0,64	0,35	3,61	899,32	592,30	1,07
3		15,55	1,45	0,71	0,37	3,52	996,58	684,52	1,14
5		14,11	1,30	0,66	0,30	3,55	1023,06	788,54	1,14
6		15,10	1,43	0,71	0,31	3,87	894,02	467,46	0,89
7		15,51	1,29	0,63	0,31	3,61	928,41	612,64	1,04
8		15,69	1,33	0,65	0,30	3,98	842,08	499,66	0,97
9		15,27	1,17	0,57	0,28	3,49	859,91	665,67	1,11
10		15,13	1,29	0,63	0,35	3,36	986,99	793,29	1,23
11		15,60	1,34	0,65	0,33	3,51	881,04	552,21	1,03
12		15,61	1,30	0,63	0,30	3,62	908,56	616,41	1,07
15		15,05	1,25	0,62	0,24	3,33	871,55	663,07	1,07
16		16,59	1,25	0,62	0,34	3,86	974	902	1,33
Media		15,60	1,31	0,64	0,31	3,63	920,32	654,42	1,09
Desvest (Sr)		0,77	0,07	0,04	0,04	0,21	57,16	121,21	0,11
COV (%)		4,94	5,54	5,79	11,70	5,76	6,21	18,52	10,09
Intervalos de confianza 95% para la Media	Int. Inf. M	15,14	1,26	0,62	0,29	3,51	885,78	581,17	1,03
	Int. Sup. M	16,07	1,35	0,66	0,33	3,76	954,86	727,66	1,16
Límite de repetibilidad (r)		2,16	0,20	0,10	0,10	0,59	160,05	339,39	0,31

ANEJO 2:

Datos experimentales extraídos del ensayo de densidades

➤ 4 % de contenido de betún

Tipo de Mezcla	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	Vp(m3)
Betún 8B					
237	887,7	1300	2413,1	2162,9	1275,2
242	816,2	1236,1	2374,5	2118,8	1302,6
Dmàx 237	2,59715469				
Dmàx 242	2,6117322				
Mitja Dmàx	2,60444344				

Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm3)	%H
1	50,1	50,1	50,6	50,3	821,9	2,016	22,58
2	49,6	50,0	50,9	50,2	832,8	2,047	21,42
3	50,0	49,6	49,5	49,7	826,7	2,052	21,20
4	49,7	48,9	48,3	49,0	767,8	1,934	25,73
5	49,3	49,6	49,9	49,6	832,0	2,070	20,53
6	49,3	49,9	49,5	49,6	831,7	2,069	20,54
7	49,3	49,3	49,7	49,4	829,3	2,069	20,57
8	48,8	49,3	49,5	49,2	828,9	2,078	20,20
9	50,1	50,3	50,1	50,2	829,2	2,038	21,75
10	50,5	49,5	50,4	50,1	830,1	2,043	21,55
11	49,7	49,4	50,1	49,7	828,1	2,054	21,12
12	49,8	49,1	49,4	49,4	827,7	2,066	20,69
13	49,9	49,2	49,6	49,6	831,2	2,068	20,59
14	49,9	49,7	49,5	49,7	828,3	2,056	21,05
15	50,1	49,8	49,7	49,9	829,7	2,051	21,23
16	49,8	49,9	50,2	50,0	826,9	2,041	21,63

➤ 4,45 % de contenido de betún

Tipo de Mezcla	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	Vp(m3)
Betún 8B					
	237	887,7	1312,9	2419,4	2162,9
	242	816,2	1249,7	2368,3	2118,8
Dmàx 237	2,6				
Dmàx 242	2,4				
Mitja Dmàx	2,5				

Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm3)	%H
1	49	48,7	49,1	48,9	829,2	2,090	15,91
2	48,7	49	49	48,9	832,9	2,101	15,47
3	48,3	48,3	48,4	48,3	820,5	2,094	15,76
4	49,3	49,5	50,1	49,6	836,1	2,078	16,40
5	48,5	48,8	48,9	48,7	831,7	2,105	15,31
6	48,8	49	49	48,9	827,8	2,087	16,05
7	48,5	48,8	49,3	48,9	828,2	2,090	15,89
8	48,6	49,1	49	48,9	839,2	2,117	14,84
9	48,4	49,1	48,5	48,7	832,3	2,109	15,13
10	49,9	50,4	49,2	49,8	843,5	2,088	16,00
11	48,9	48,9	49	48,9	825,8	2,082	16,25
12	49,1	48,9	48,3	48,8	835,9	2,114	14,94
13	48,7	48,6	48,6	48,6	834,9	2,117	14,81
14	48,9	48,6	48,9	48,8	829,5	2,097	15,65
15	49	49,1	49,3	49,1	839,2	2,107	15,24
16	48,5	48,6	48,8	48,6	829,8	2,105	15,33

➤ 5,5 % de contenido de betún

Tipo de Mezcla	m1(g)	m2(g)	m3(g)	m4(g)	Vp(m3)
Betún 8B					
237	887,7	1326,4	2425,8	2162,9	1275,2
242	816,2	1221,1	2356,7	2118,8	1302,6
Dmàx 237	2,54330819				
Dmàx 242	2,47519685				
Mitja Dmàx	2,509				

Probeta nº	H1(mm)	H2(mm)	H3(mm)	H(mm)	Peso seco (g)	Densidad geo (g/cm3)	%H
1	49,6	49,6	49,5	49,6	836,6	2,082	17,03
2	48,9	49,5	49,5	49,3	836,4	2,093	16,60
3	49,0	49,0	49,3	49,1	843,5	2,119	15,55
4	48,0	48,9	48,8	48,6	836,8	2,125	15,30
5	47,4	47,5	47,7	47,5	830,5	2,155	14,11
6	48,6	48,7	48,7	48,7	840,5	2,130	15,10
7	48,4	48,7	48,7	48,6	835,3	2,120	15,51
8	49,0	49,1	49,0	49,0	841,0	2,116	15,69
9	48,2	48,5	48,3	48,3	833,1	2,126	15,27
10	48,9	49,1	48,7	48,9	844,3	2,130	15,13
11	49,0	49,1	48,7	48,9	840,2	2,118	15,60
12	48,5	49,0	48,8	48,8	837,2	2,118	15,61
13	49,2	49,0	49,0	49,1	843,9	2,121	15,46
14	49,0	48,9	48,7	48,9	835,4	2,109	15,97
15	48,4	49,0	49,2	48,9	844,5	2,132	15,05
16	49,3	49,1	48,8	49,1	832,6	2,093	16,59

ANEJO 3:

4 % de contenido de betún a 20 °C

Test de Grubbs':

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	21,399	1,301	20,200	25,730	3,33	0,000
Fmáx	16	0,25849	0,02478	0,19487	0,29621	2,57	0,055
RT	16	0,12400	0,01193	0,09412	0,14275	2,50	0,075
DFmáx	16	0,5267	0,1195	0,3471	0,7622	1,97	0,585
IRT	16	0,5671	0,2637	0,0803	0,9626	1,85	0,844
GF	16	304,6	46,3	228,5	401,5	2,09	0,396
IT	16	618,1	198,0	281,3	959,2	1,72	1,000
d0,5Pm	16	2,755	0,455	1,876	3,507	1,93	0,655

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
%H	4	25,7298

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

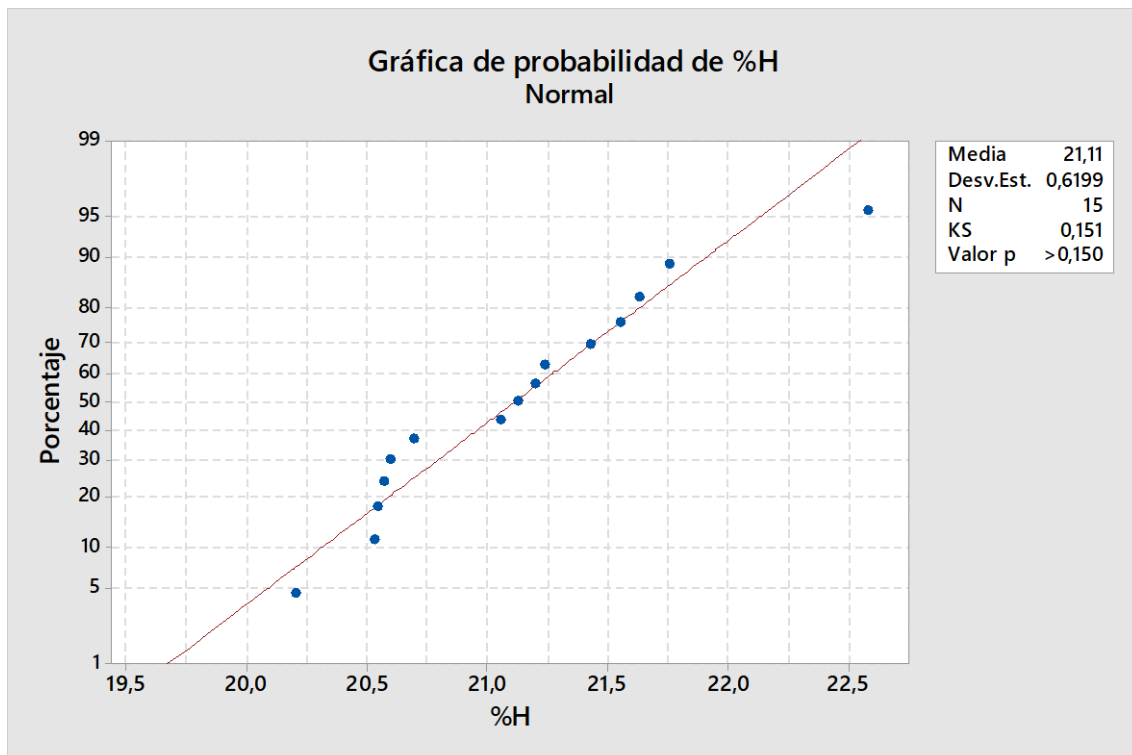
Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

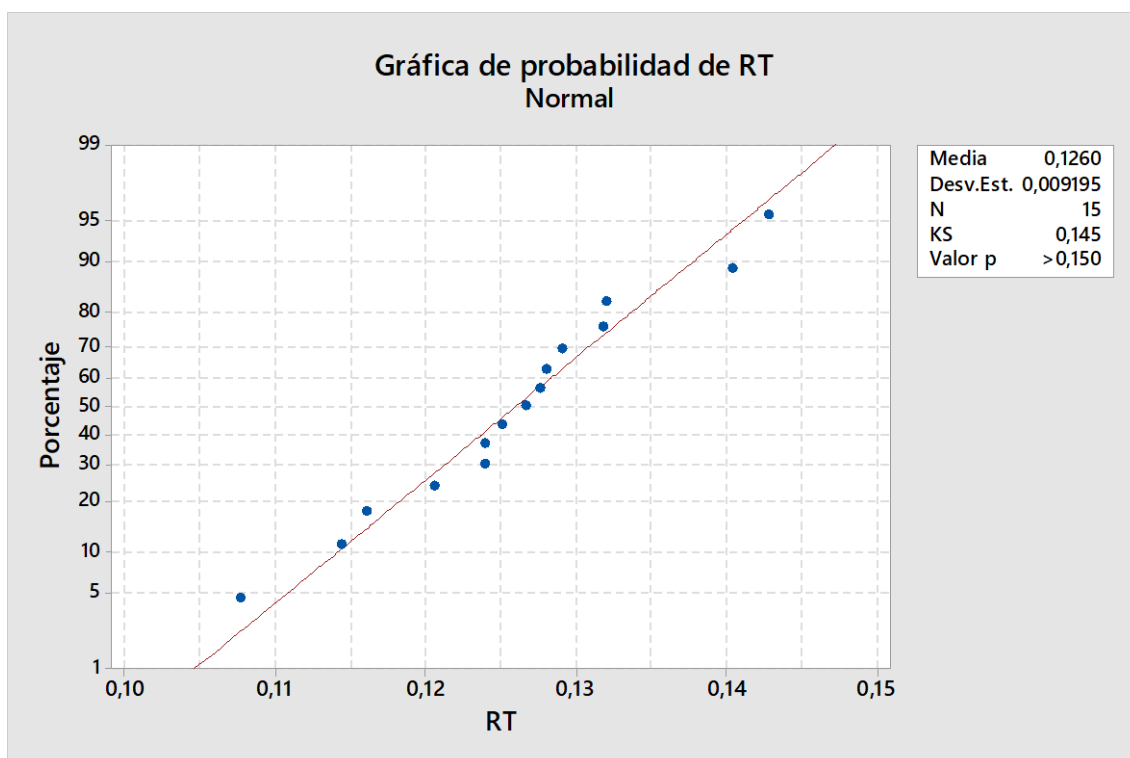
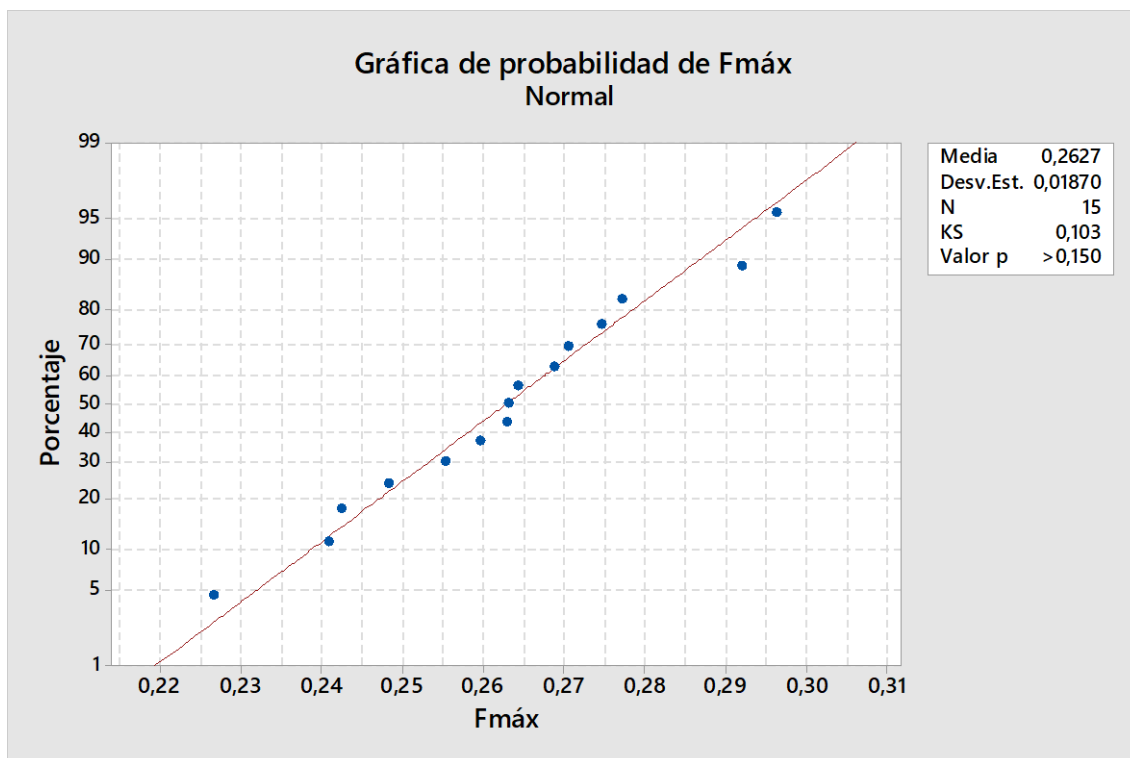
Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	15	21,111	0,620	20,200	22,579	2,37	0,120
Fmáx	15	0,26273	0,01870	0,22650	0,29621	1,94	0,591
RT	15	0,12599	0,00919	0,10769	0,14275	1,99	0,502
DFmáx	15	0,5316	0,1220	0,3471	0,7622	1,89	0,683
IRT	15	0,6474	0,1797	0,4002	0,9626	1,75	1,000
GF	15	309,6	43,1	241,3	401,5	2,13	0,312
IT	15	640,5	182,6	336,8	959,2	1,74	1,000
d0,5Pm	15	2,814	0,403	2,277	3,507	1,72	1,000

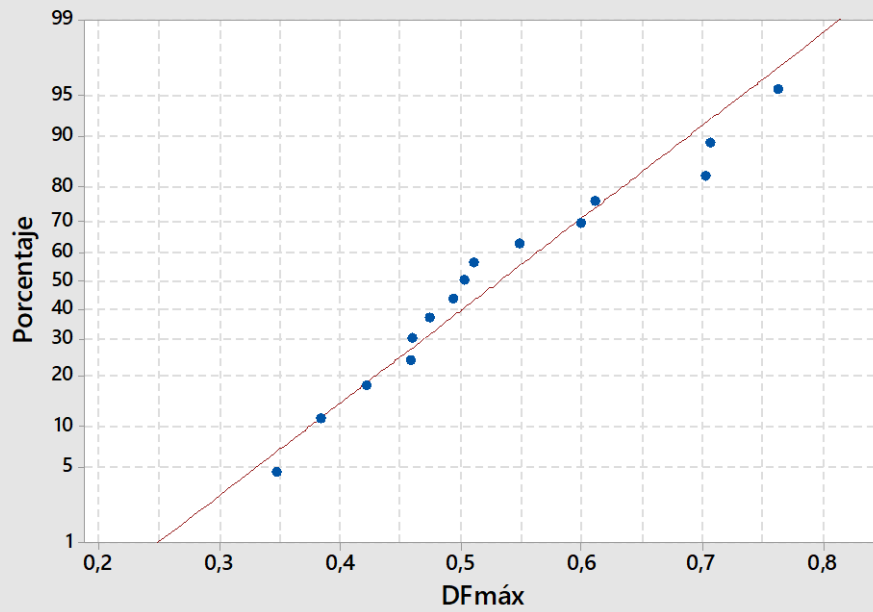
* NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

Test de Kolmogorov-Smirnov:



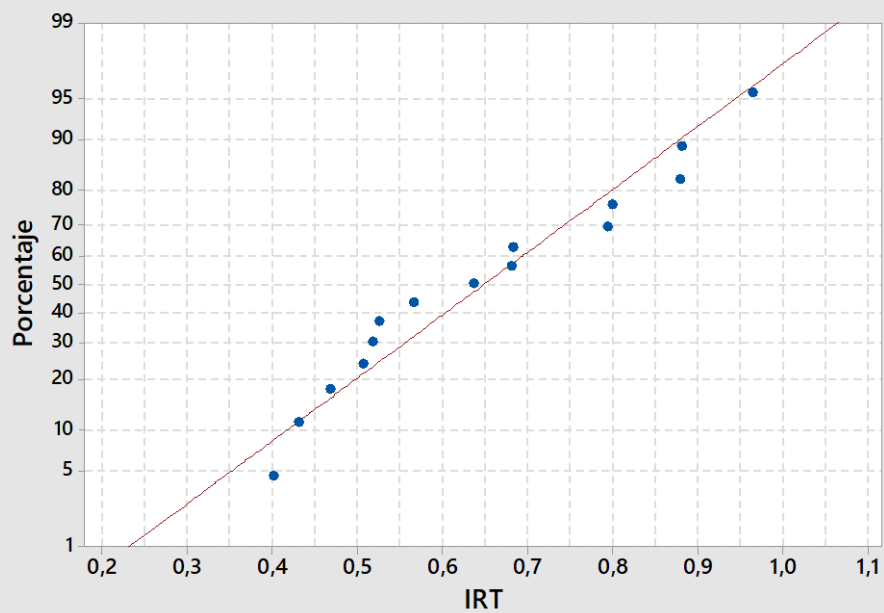


Gráfica de probabilidad de DFmáx
Normal



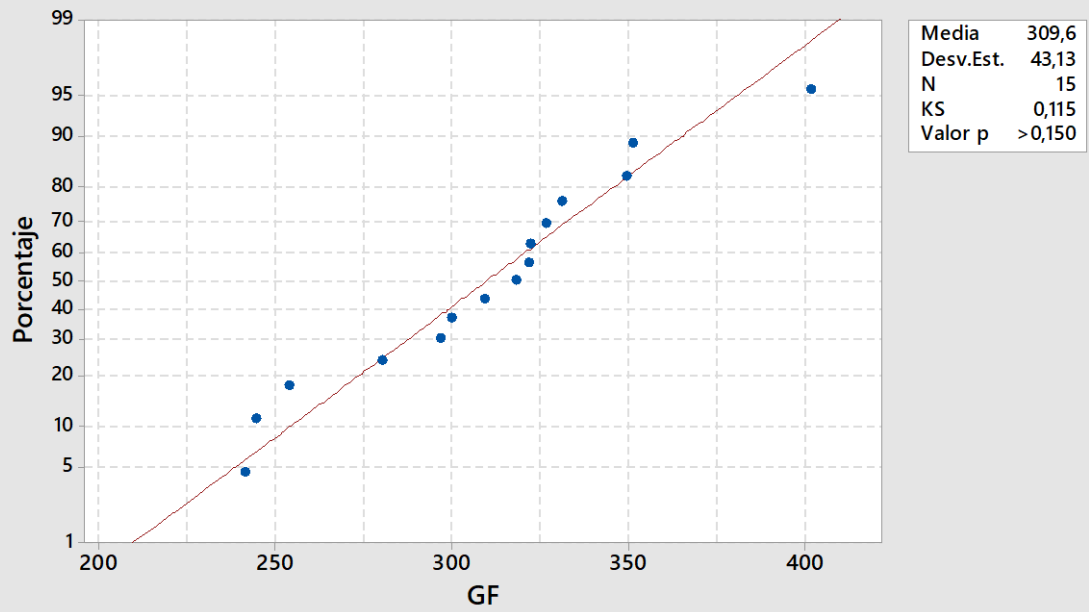
Media	0,5316
Desv.Est.	0,1220
N	15
KS	0,172
Valor p	>0,150

Gráfica de probabilidad de IRT
Normal

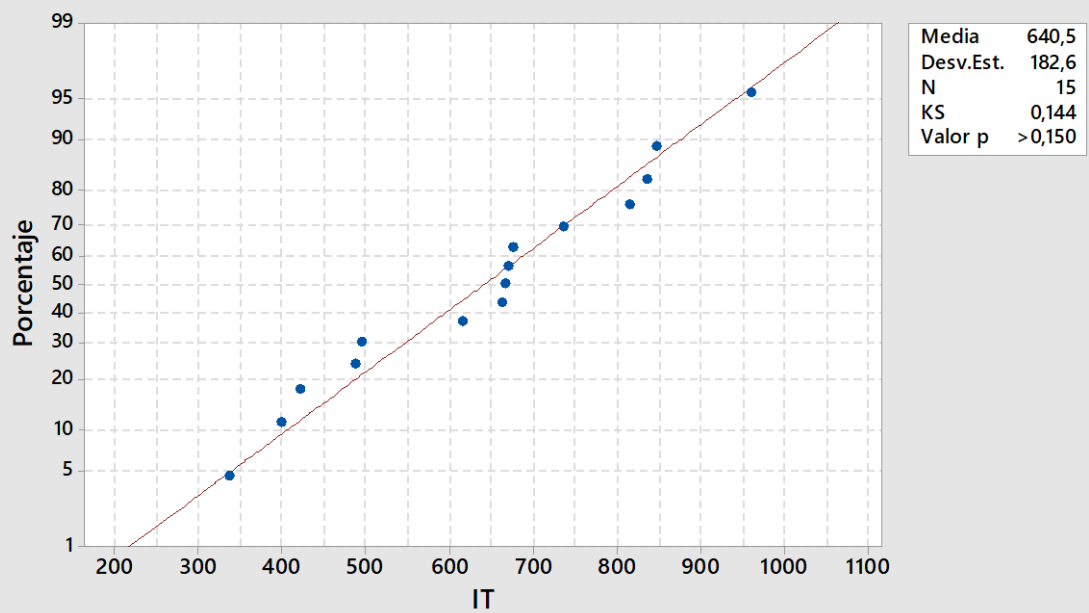


Media	0,6474
Desv.Est.	0,1797
N	15
KS	0,155
Valor p	>0,150

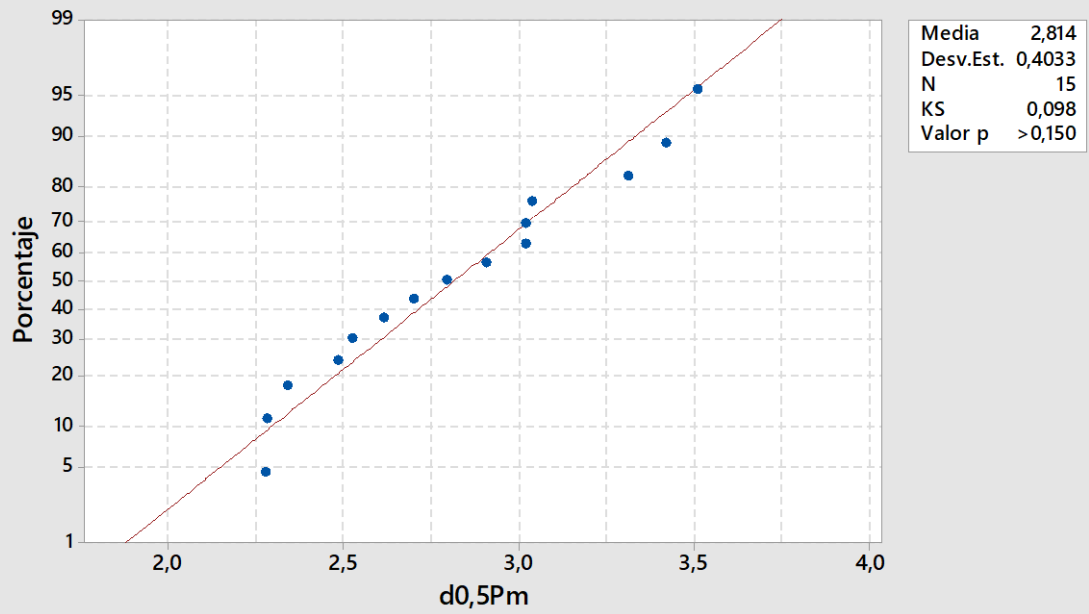
Gráfica de probabilidad de GF
Normal



Gráfica de probabilidad de IT
Normal



Gráfica de probabilidad de d0,5Pm
Normal



4 % de contenido de betún a 5 °C

Test de Grubbs':

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	21,399	1,301	20,200	25,730	3,33	0,000
Fmáx	16	1,1854	0,1302	0,9460	1,4831	2,29	0,195
RT	16	0,5700	0,0613	0,4639	0,7124	2,32	0,167
DFmáx	16	0,22690	0,02556	0,16781	0,27818	2,31	0,176
IRT	16	3,987	0,638	2,696	5,178	2,03	0,493
GF	16	626,0	97,1	472,7	842,9	2,23	0,239
IT	16	347,9	108,4	191,8	595,3	2,28	0,197
d0,5Pm	16	0,8271	0,1002	0,6819	0,9943	1,67	1,000

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
%H	4	25,7298

Prueba de valores atípicos: %H1; Fmáx1; RT1; DFmáx1; ... 1; IT1; d0,5Pm1

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

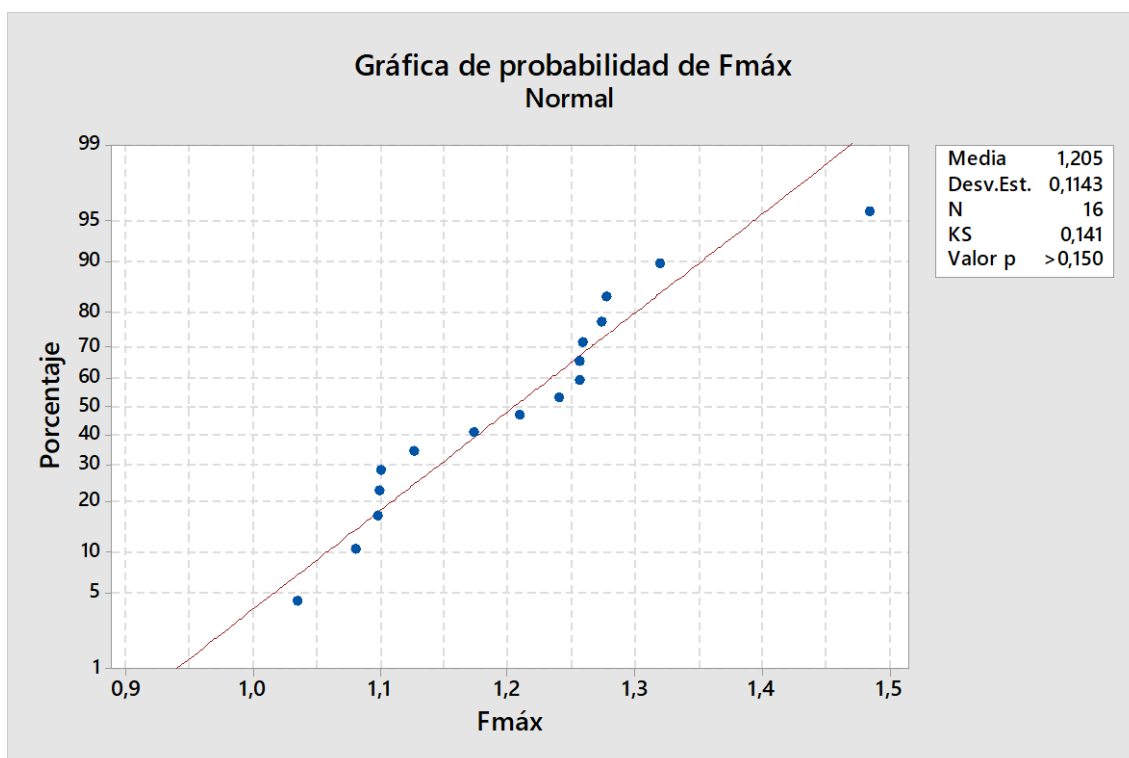
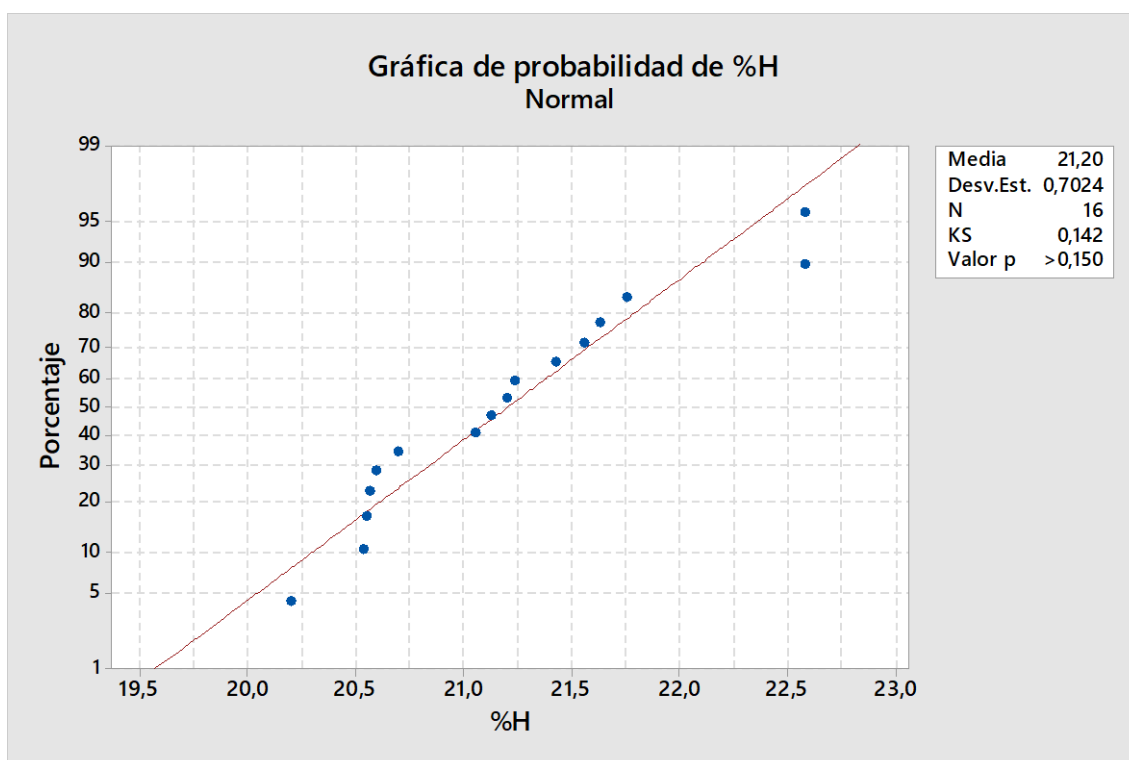
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

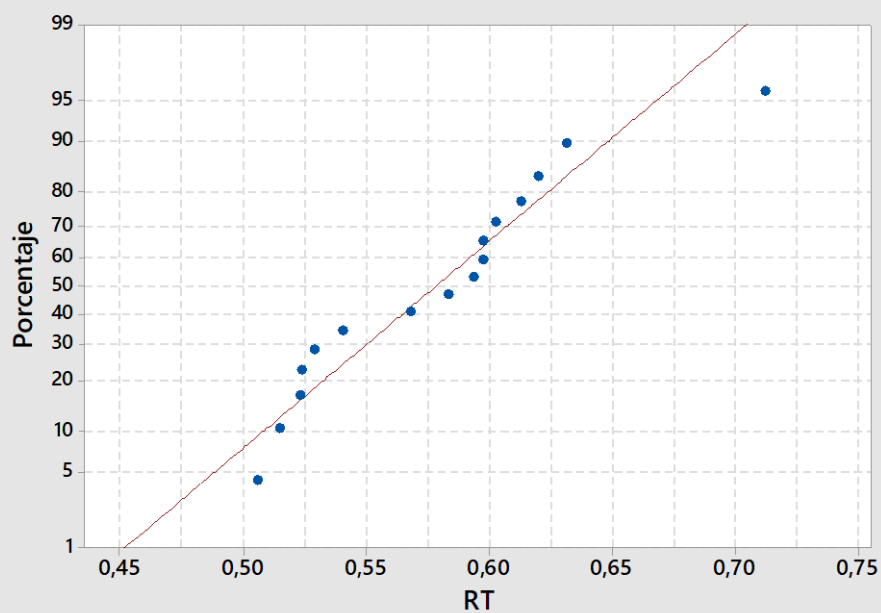
Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H1	15	21,111	0,620	20,200	22,579	2,37	0,120
Fmáx1	15	1,2013	0,1175	1,0340	1,4831	2,40	0,105
RT1	15	0,5771	0,0562	0,5059	0,7124	2,41	0,102
DFmáx1	15	0,22349	0,02236	0,16781	0,26457	2,49	0,068
IRT1	15	4,073	0,555	3,127	5,178	1,99	0,503
GF1	15	620,3	97,7	472,7	842,9	2,28	0,177
IT1	15	345,6	111,8	191,8	595,3	2,23	0,211
d0,5Pm1	15	0,8257	0,1036	0,6819	0,9943	1,63	1,000

* NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

Test de Kolmogorov-Smirnov:

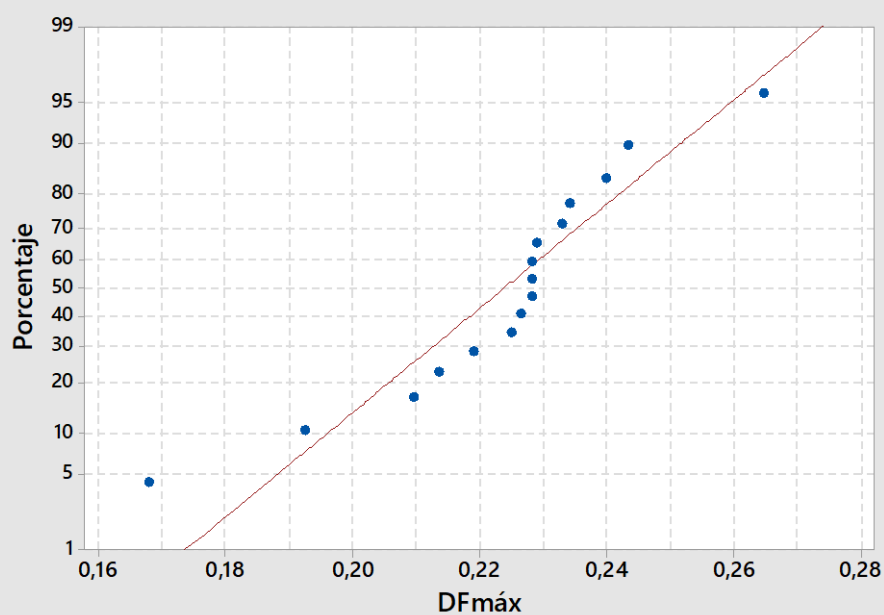


Gráfica de probabilidad de RT
Normal



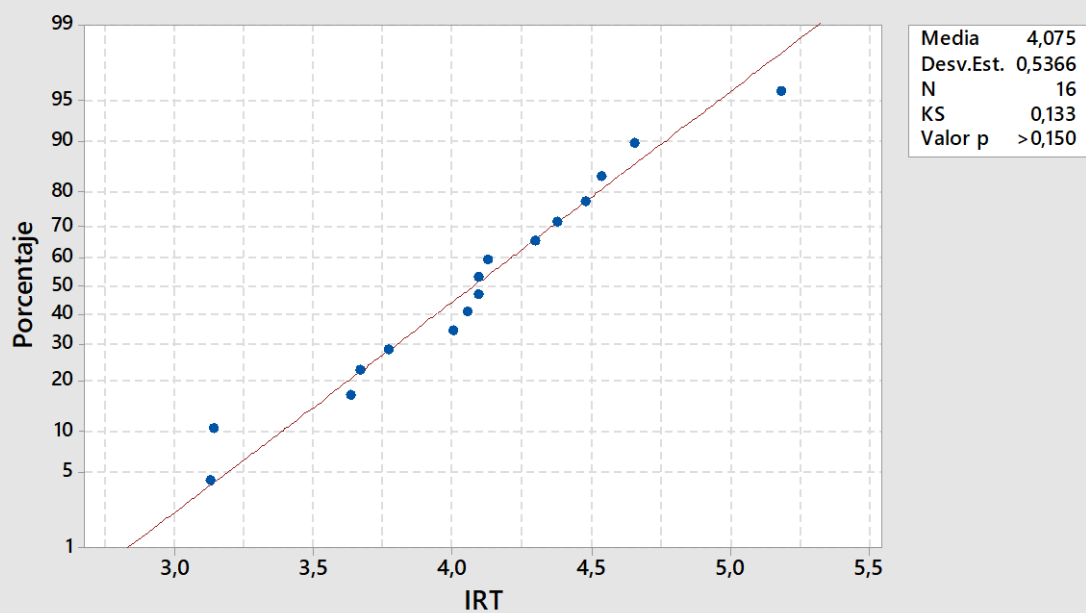
Media 0,5784
Desv.Est. 0,05457
N 16
KS 0,132
Valor p >0,150

Gráfica de probabilidad de DFmáx
Normal

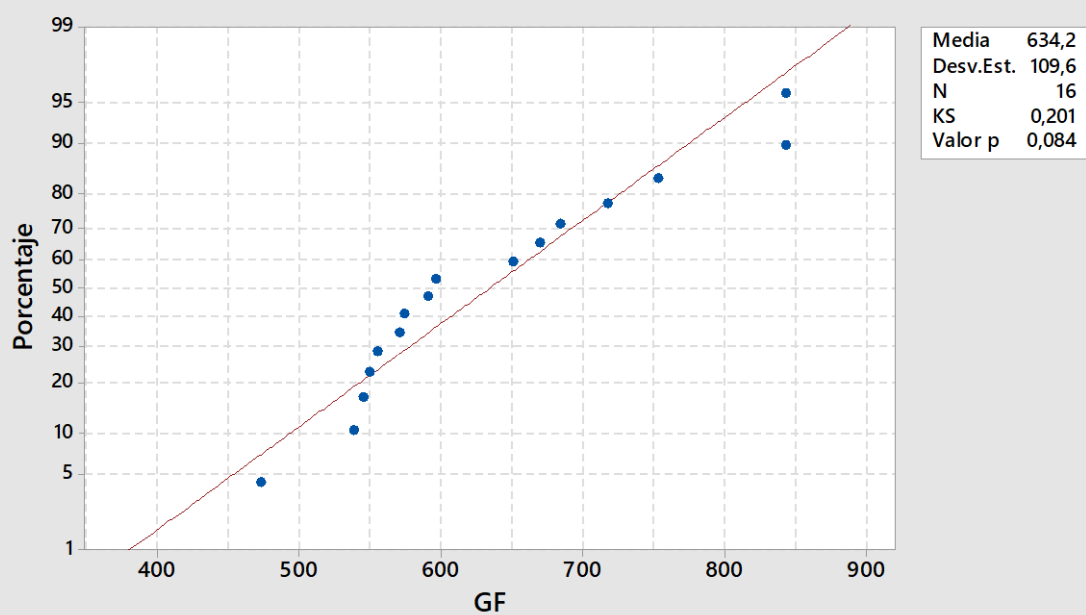


Media 0,2238
Desv.Est. 0,02163
N 16
KS 0,205
Valor p 0,071

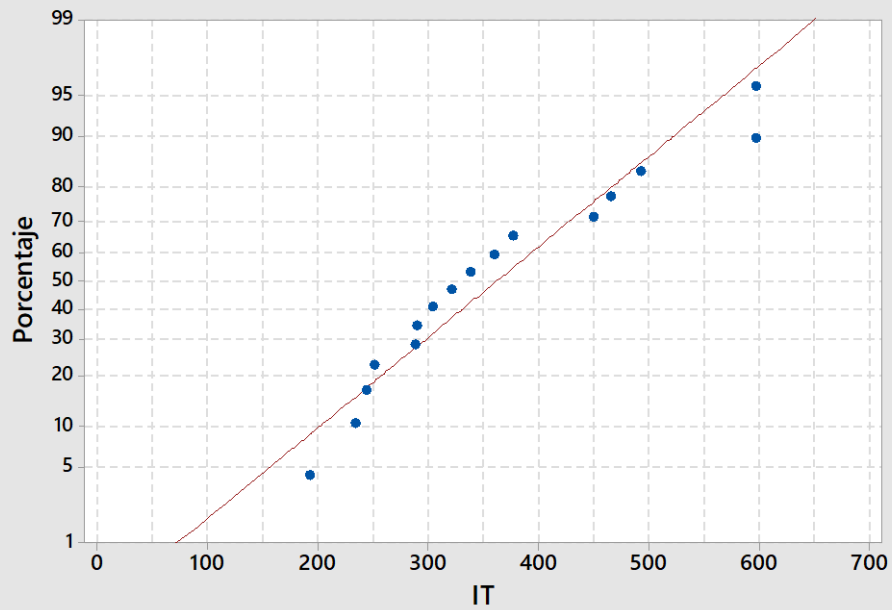
Gráfica de probabilidad de IRT
Normal



Gráfica de probabilidad de GF
Normal

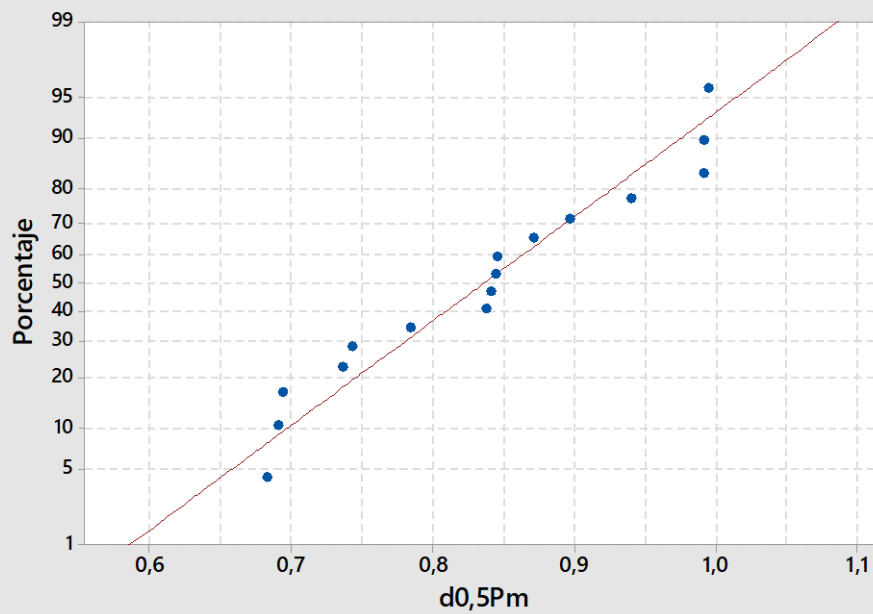


Gráfica de probabilidad de IT
Normal



Media	361,2
Desv.Est.	124,7
N	16
KS	0,143
Valor p	>0,150

Gráfica de probabilidad de d0,5Pm
Normal



Media	0,8360
Desv.Est.	0,1082
N	16
KS	0,129
Valor p	>0,150

4,75 % de contenido de betún a 20 °C

Test de Grubbs':

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	15,561	0,503	14,807	16,404	1,68	1,000
Fmáx	16	0,29703	0,03054	0,27115	0,39721	3,28	0,000
RT	16	0,14674	0,01526	0,13326	0,19490	3,16	0,001
DFmáx	16	0,5105	0,0846	0,3465	0,6682	1,94	0,648
IRT	16	0,8511	0,1666	0,6300	1,2069	2,14	0,341
GF	16	363,4	41,5	302,0	436,4	1,76	1,000
IT	16	745,1	202,4	347,5	1095,1	1,96	0,596
d0,5Pm	16	2,806	0,463	1,776	3,711	2,22	0,248

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
Fmáx	4	0,397208
RT	4	0,194897

[Gráfica de valores atípicos de %H](#)

[Gráfica de valores atípicos de Fmáx](#)

[Gráfica de valores atípicos de RT](#)

[Gráfica de valores atípicos de DFmáx](#)

[Gráfica de valores atípicos de IRT](#)

[Gráfica de valores atípicos de GF](#)

[Gráfica de valores atípicos de IT](#)

[Gráfica de valores atípicos de d0,5Pm](#)

Prueba de valores atípicos: %H1; Fmáx1; RT1; DFmáx1; ... 1; IT1; d0,5Pm1

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

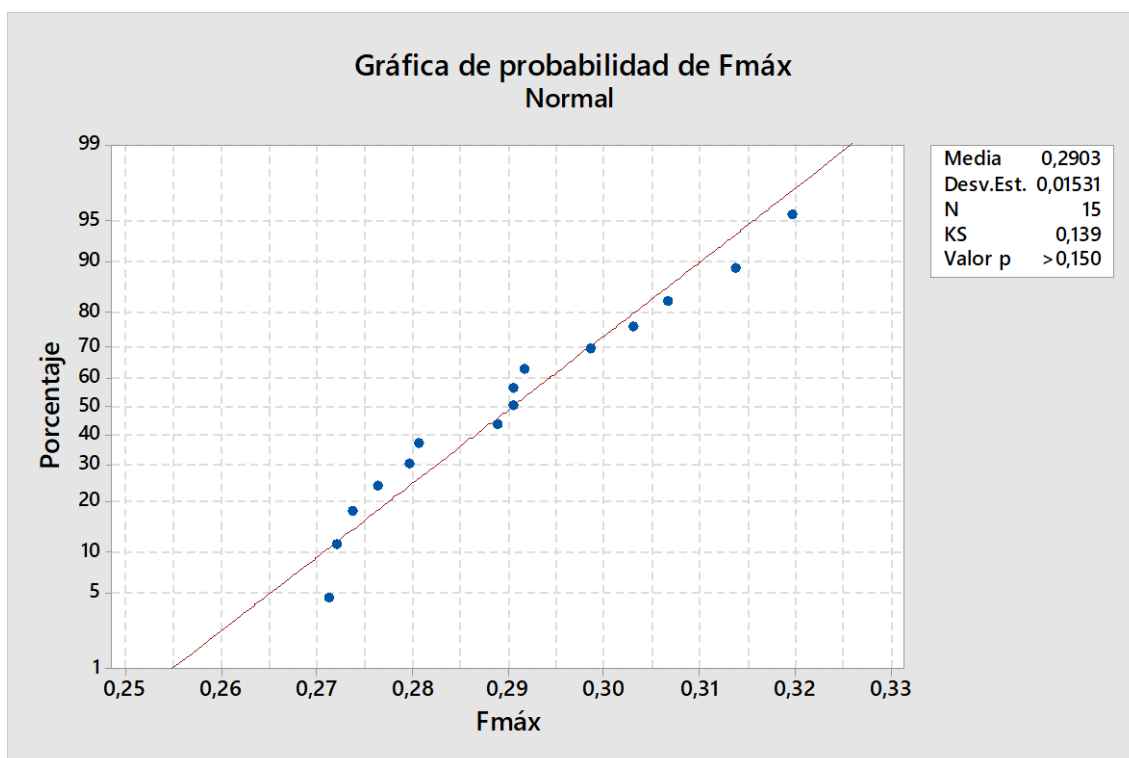
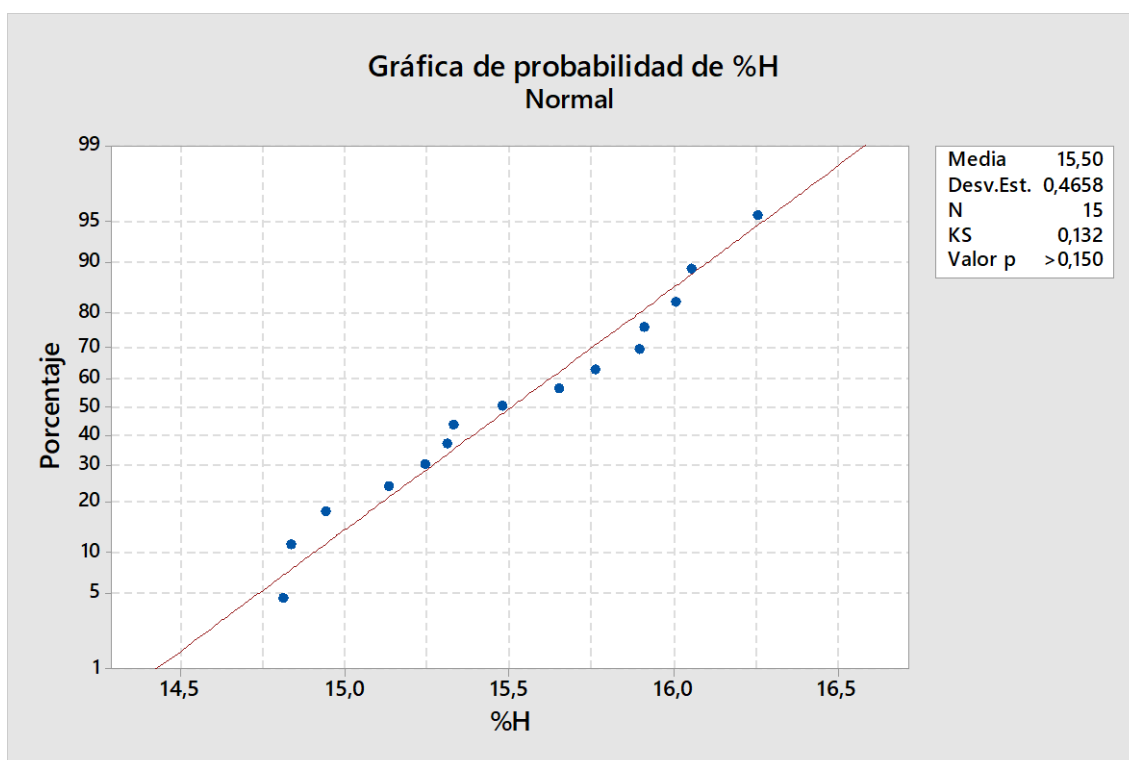
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

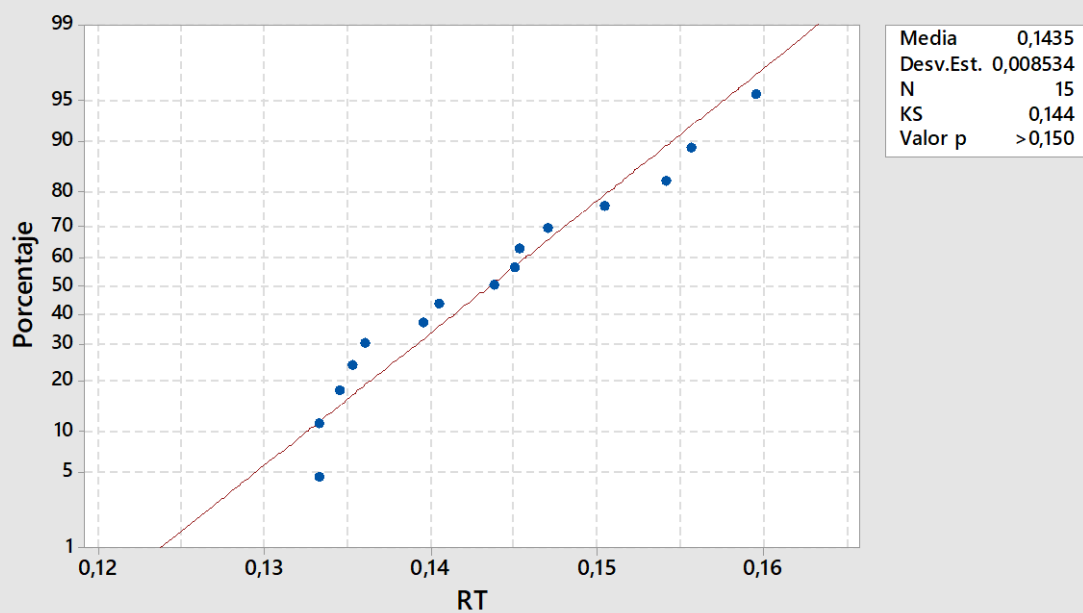
Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H1	15	15,505	0,466	14,807	16,252	1,60	1,000
Fmáx1	15	0,29035	0,01531	0,27115	0,31954	1,91	0,649
RT1	15	0,14353	0,00853	0,13326	0,15948	1,87	0,725
DFmáx1	15	0,5214	0,0750	0,4017	0,6682	1,96	0,555
IRT1	15	0,8274	0,1418	0,6300	1,1801	2,49	0,068
GF1	15	367,5	39,4	305,7	436,4	1,75	1,000
IT1	15	771,6	178,5	538,4	1095,1	1,81	0,852
d0,5Pm1	15	2,8747	0,3860	2,4072	3,7111	2,17	0,273

*** NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%**

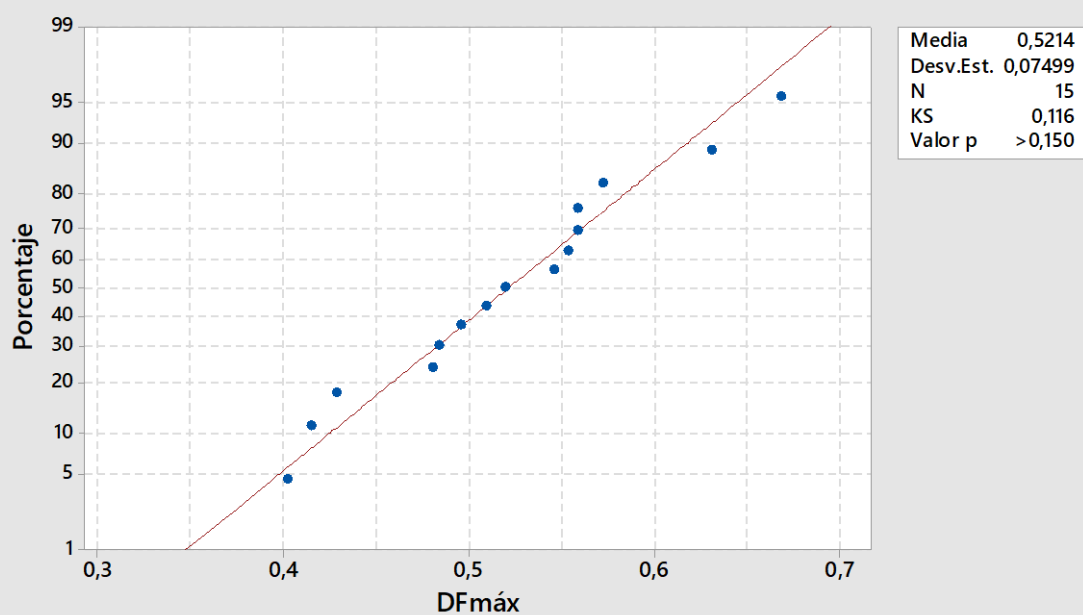
Test de Kolmogorov-Smirnov:



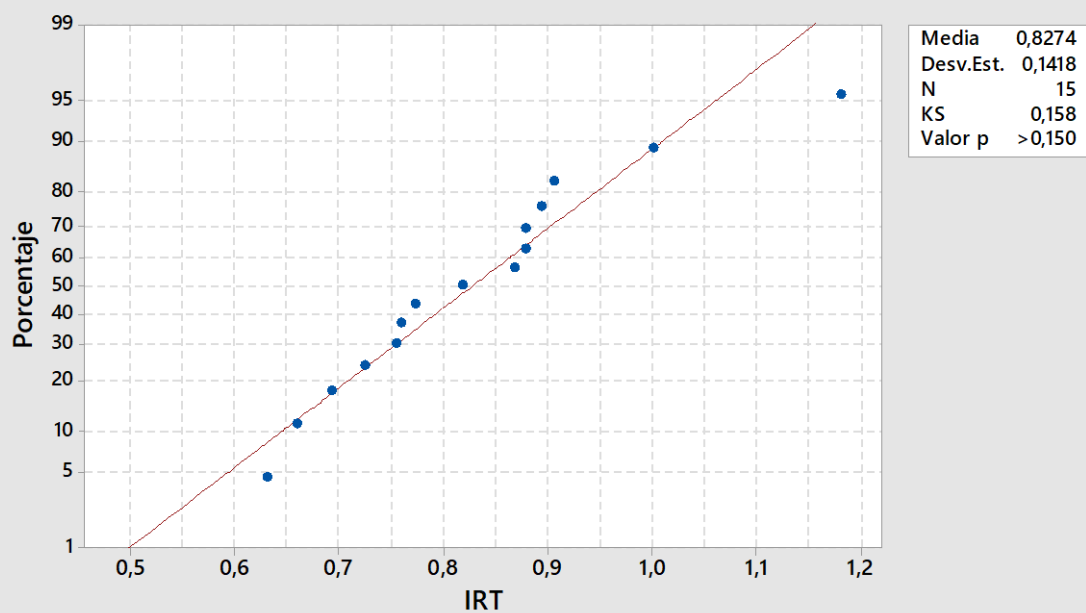
Gráfica de probabilidad de RT
Normal



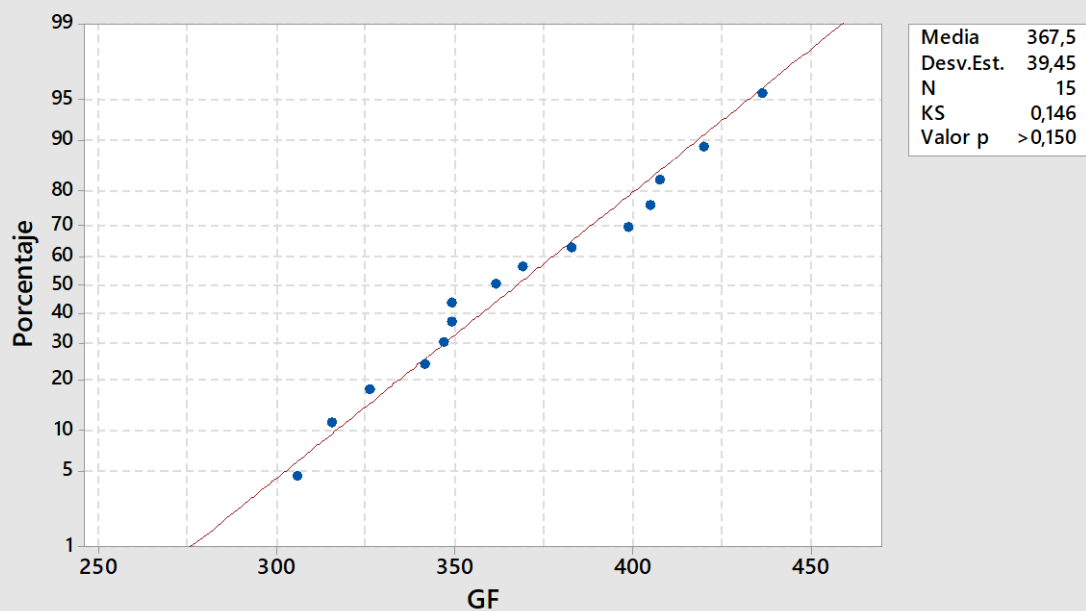
Gráfica de probabilidad de DFmáx
Normal



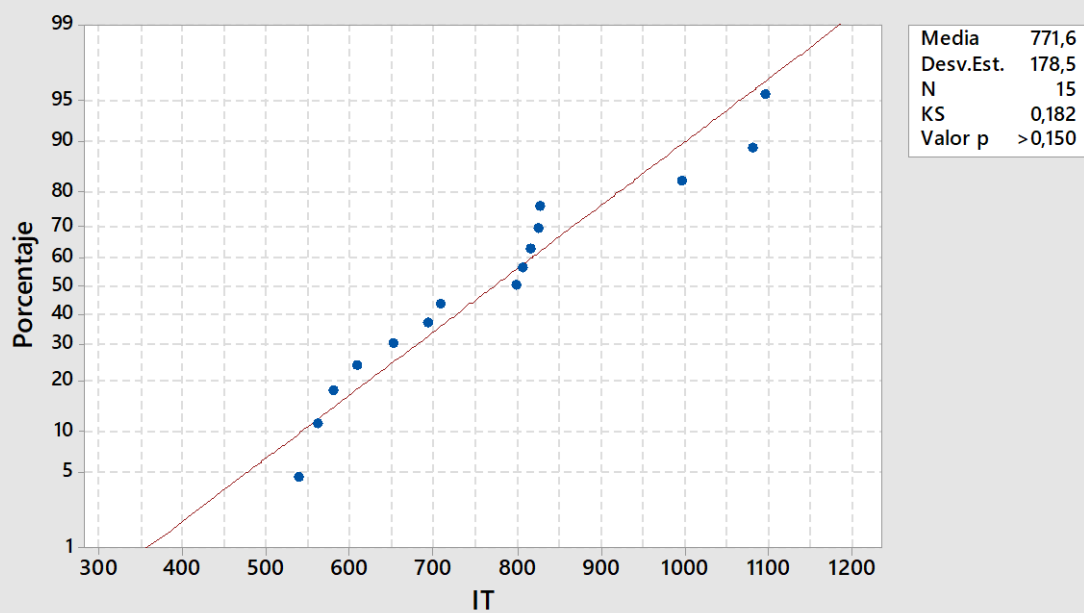
Gráfica de probabilidad de IRT
Normal



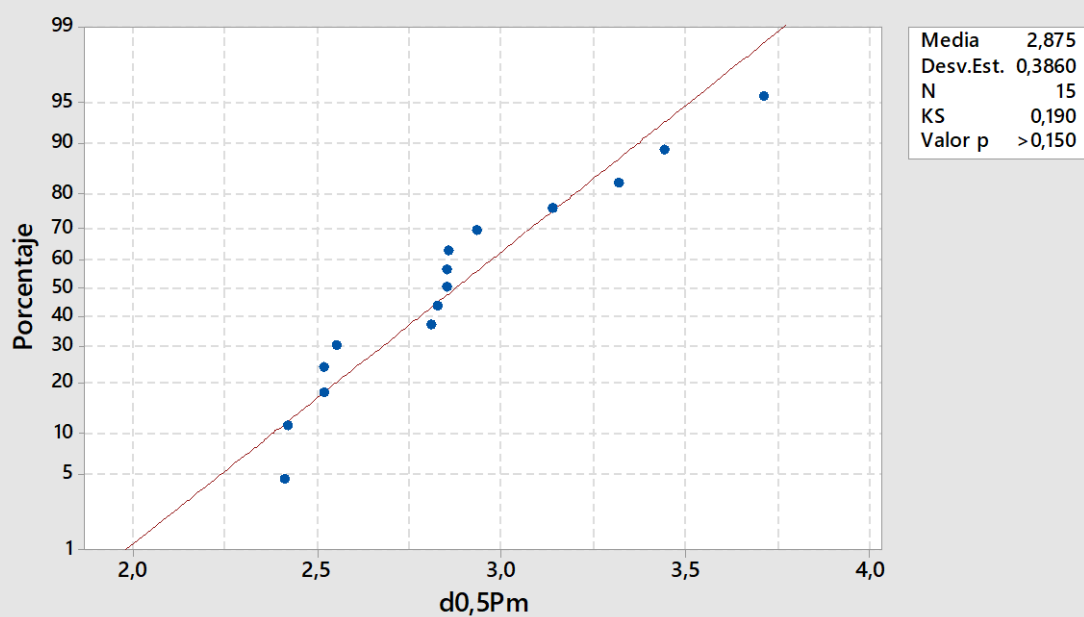
Gráfica de probabilidad de GF
Normal



Gráfica de probabilidad de IT
Normal



Gráfica de probabilidad de d0,5Pm
Normal



4,75 % de contenido de betún a 5 °C

Test de Grubbs':

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

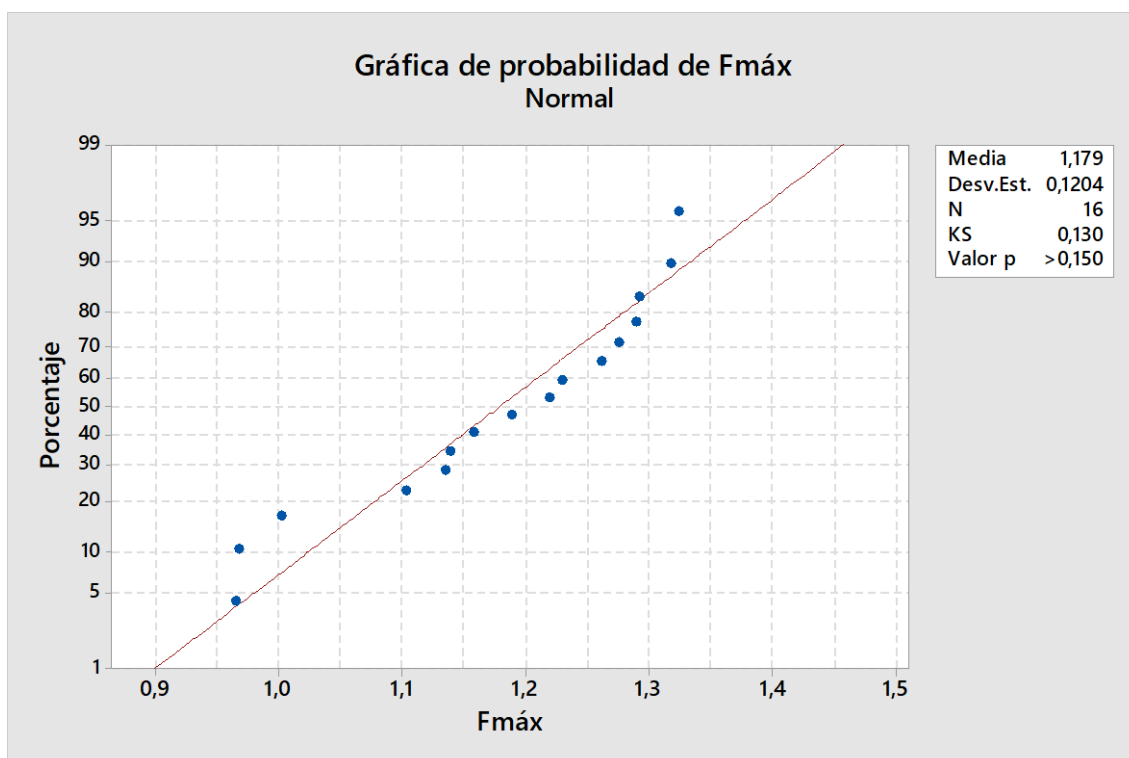
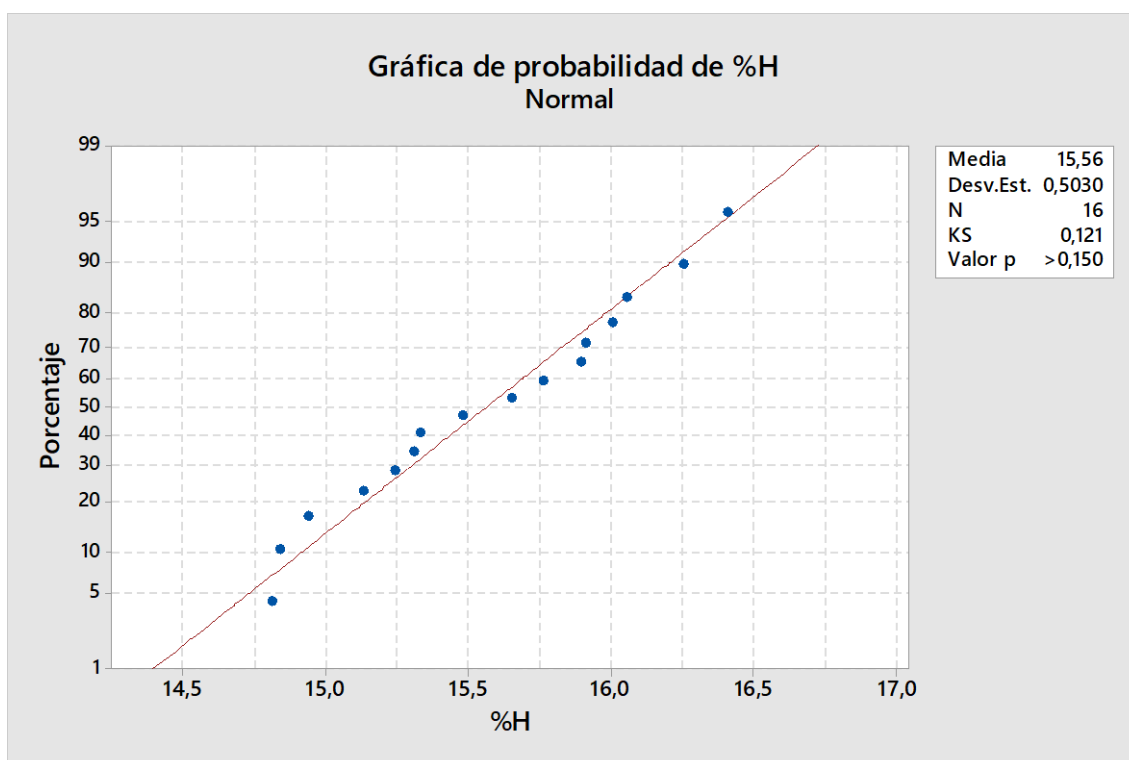
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

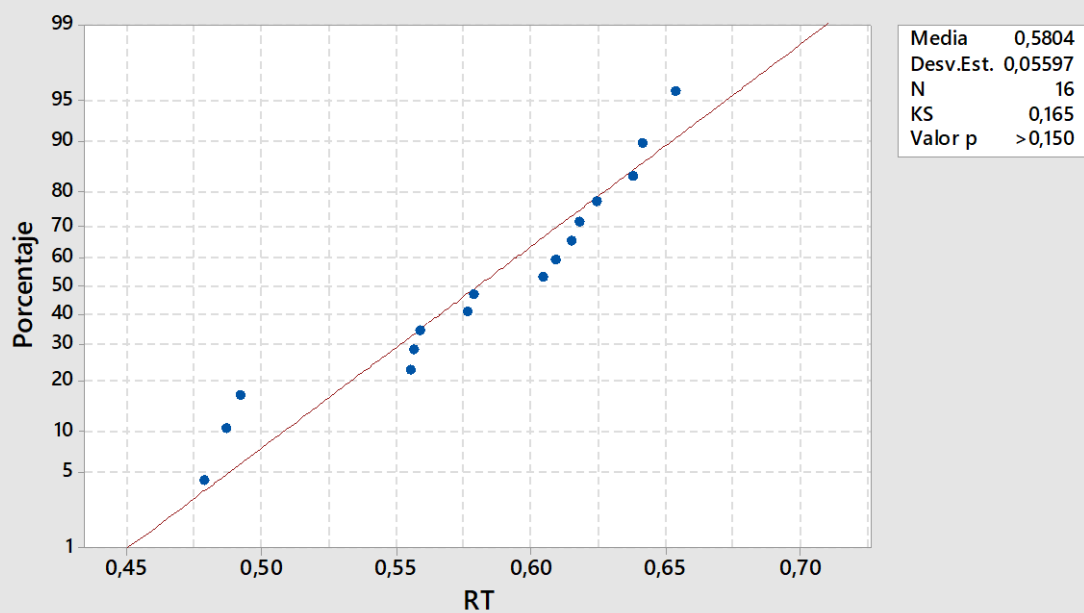
Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	15,561	0,503	14,807	16,404	1,68	1,000
Fmáx	16	1,1788	0,1204	0,9647	1,3236	1,78	1,000
RT	16	0,5804	0,0560	0,4784	0,6537	1,82	0,900
DFmáx	16	0,24500	0,03486	0,18484	0,29351	1,73	1,000
IRT	16	3,851	0,694	2,680	5,099	1,80	0,962
GF	16	694,0	95,9	523,1	915,4	2,31	0,177
IT	16	458,5	164,8	184,1	777,5	1,94	0,651
d0,5Pm	16	0,9553	0,1781	0,6285	1,3105	1,99	0,545

*** NOTA * No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%**

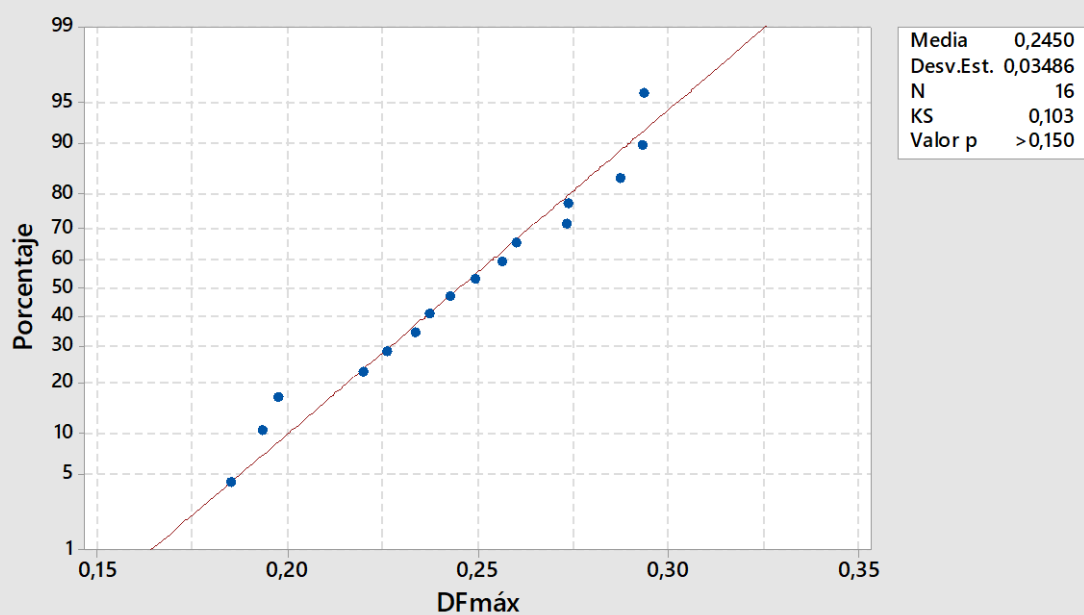
Test de Kolmogorov-Smirnov:



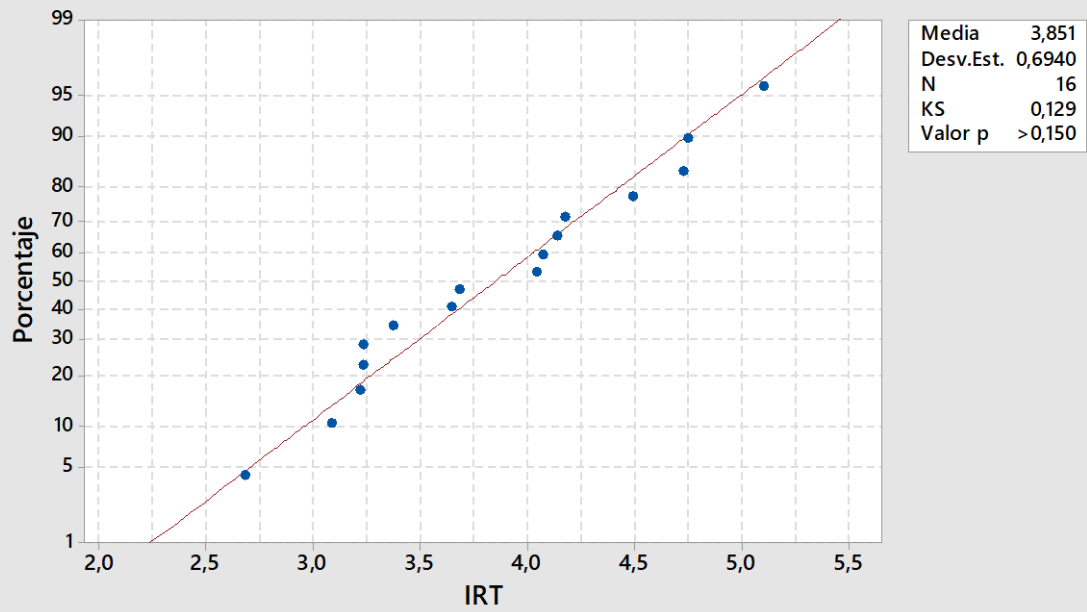
Gráfica de probabilidad de RT
Normal



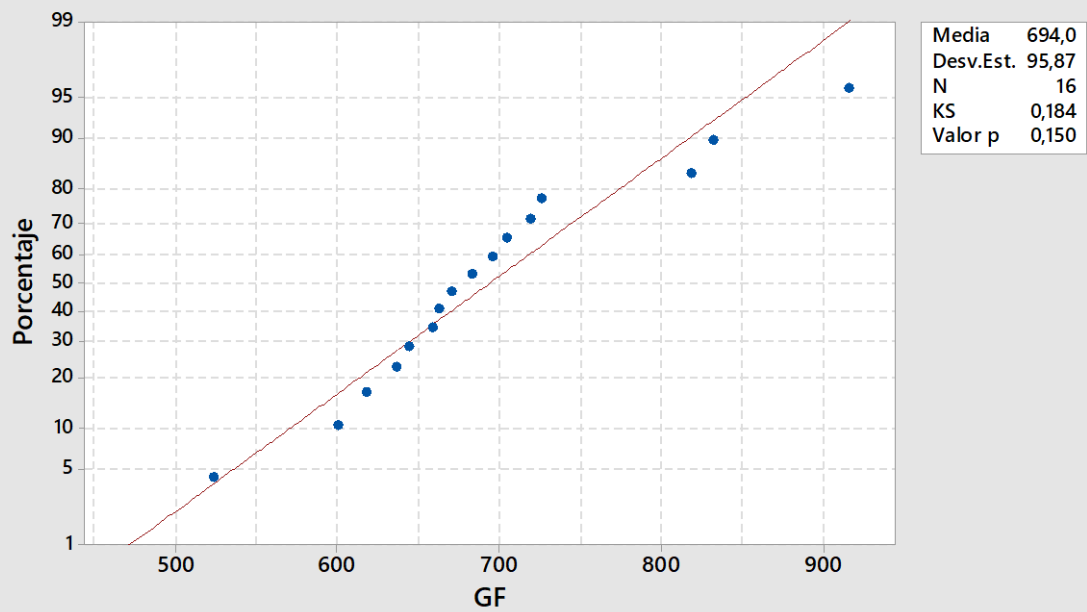
Gráfica de probabilidad de DFmáx
Normal



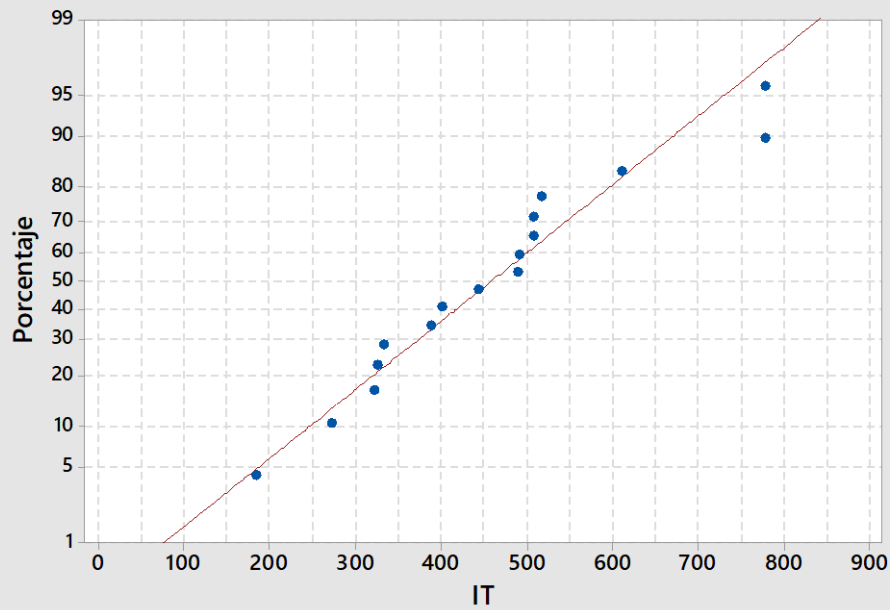
Gráfica de probabilidad de IRT
Normal



Gráfica de probabilidad de GF
Normal

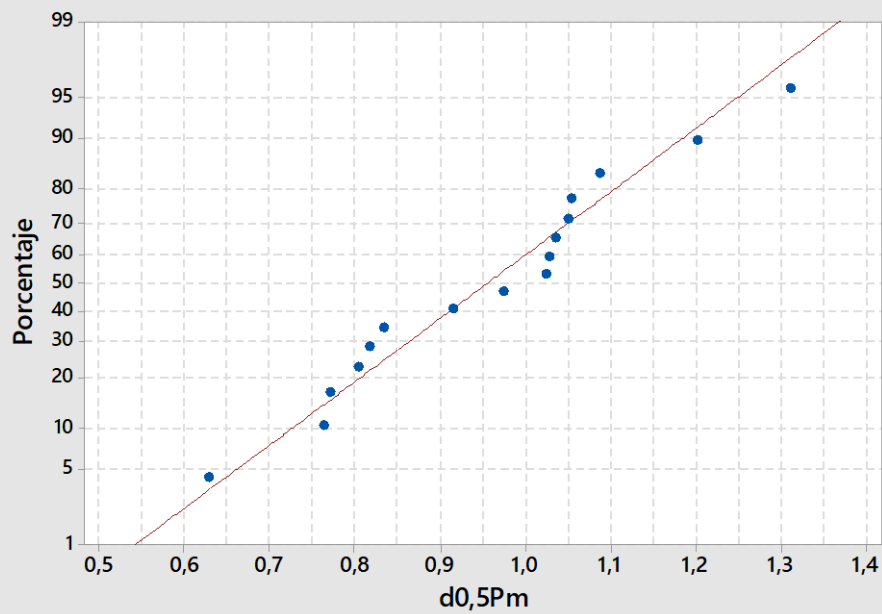


Gráfica de probabilidad de IT
Normal



Media	458,5
Desv.Est.	164,8
N	16
KS	0,177
Valor p	>0,150

Gráfica de probabilidad de d0,5Pm
Normal



Media	0,9553
Desv.Est.	0,1781
N	16
KS	0,148
Valor p	>0,150

5.5 % de contenido de betún a 20 °C

Test de Grubbs':

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,1Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	15,599	0,702	14,115	17,033	2,12	0,365
Fmáx	16	0,27393	0,03899	0,15949	0,33020	2,94	0,005
RT	16	0,13379	0,01942	0,07778	0,16093	2,88	0,008
DFmáx	16	0,6302	0,1585	0,2471	0,9776	2,42	0,113
IRT	16	0,5724	0,2742	0,0292	0,9441	1,98	0,566
GF	16	373,3	57,8	212,1	466,1	2,79	0,015
IT	16	967,9	247,0	484,3	1359,0	1,96	0,608
d0,1Pm	16	3,573	0,541	2,357	4,501	2,25	0,226

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
Fmáx	2	0,159
RT	2	0,078
GF	2	212,075

Prueba de valores atípicos: %H1; Fmáx1; RT1; DFmáx1; ... 1; IT1; d0,1Pm1

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

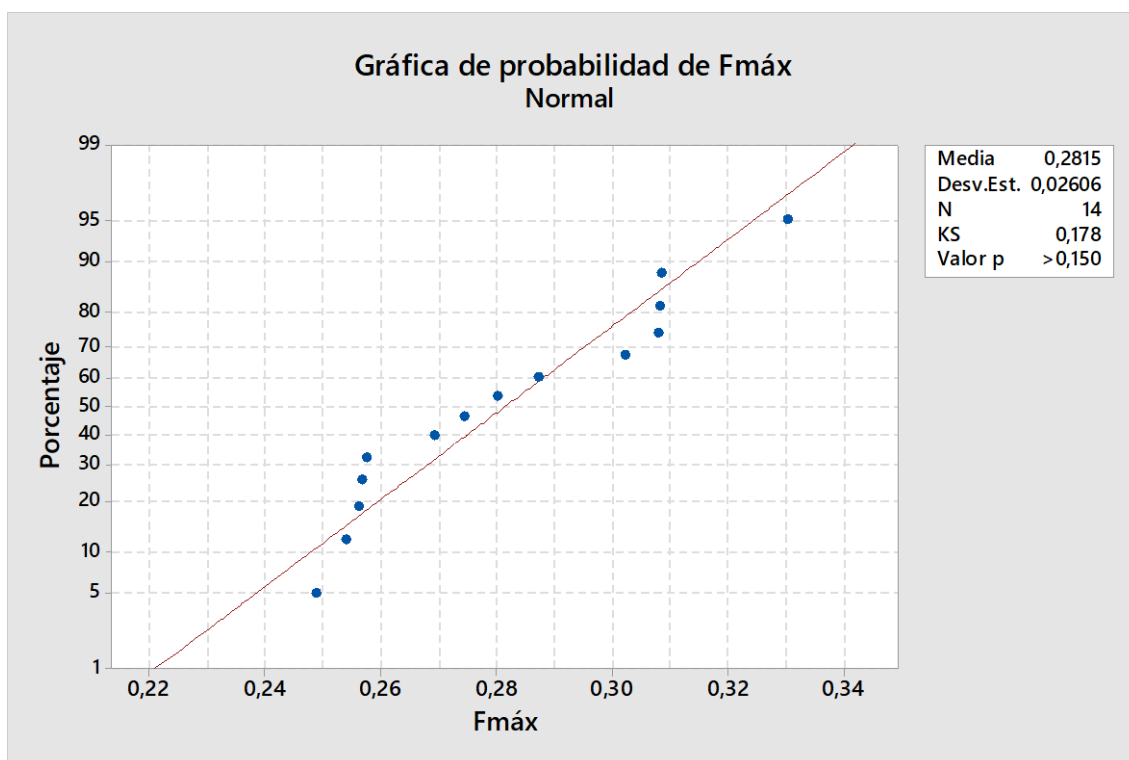
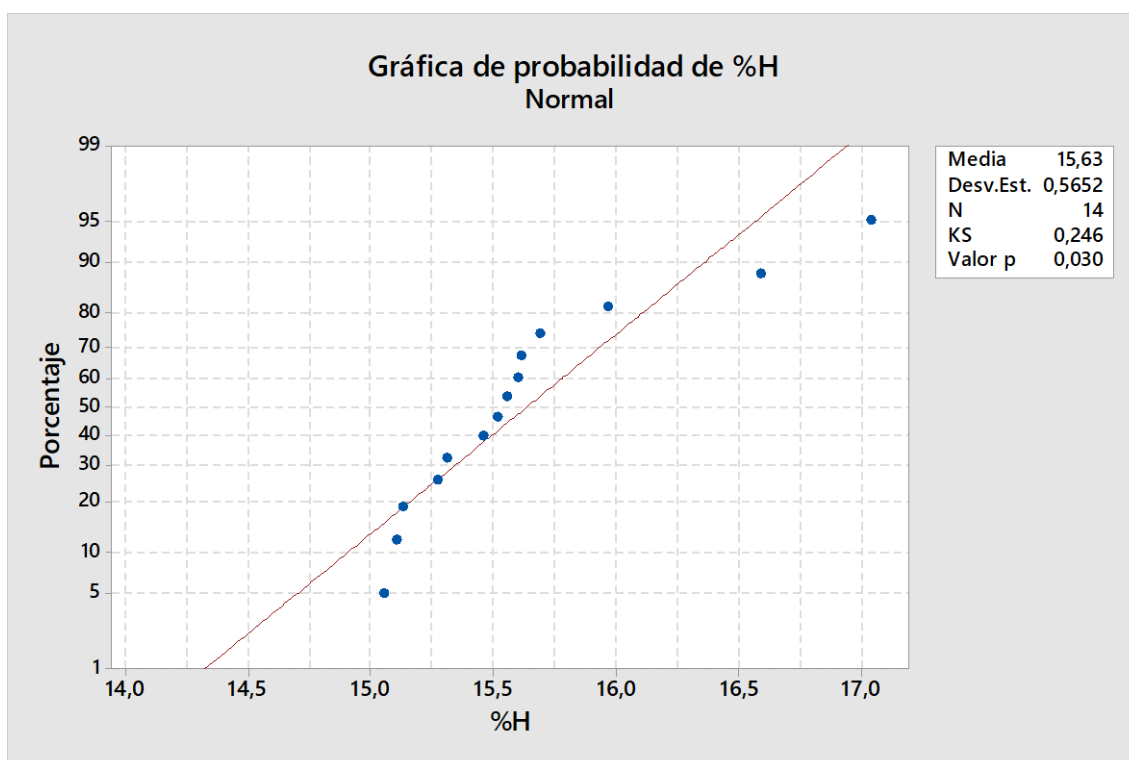
Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H1	15	15,532	0,671	14,115	17,033	2,24	0,209
Fmáx1	15	0,28156	0,02512	0,24870	0,33020	1,94	0,593
RT1	15	0,13753	0,01284	0,12062	0,16093	1,82	0,830
DFmáx1	15	0,6070	0,1331	0,2471	0,8386	2,70	0,020
IRT1	15	0,6086	0,2410	0,1288	0,9441	1,99	0,500
GF1	15	384,0	40,0	326,1	466,1	2,05	0,407
IT1	15	994,4	230,9	484,3	1359,0	2,21	0,232
d0,1Pm1	15	3,511	0,498	2,357	4,276	2,32	0,149

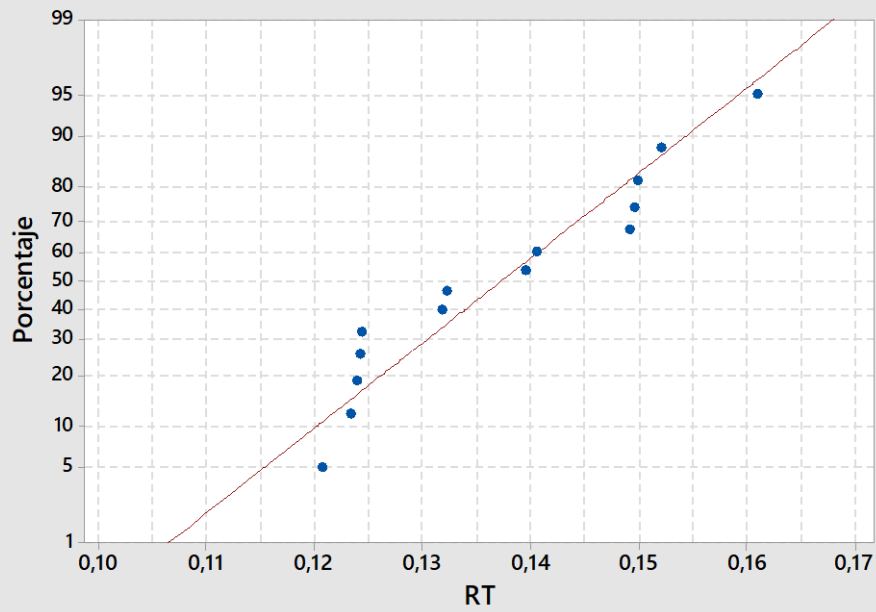
Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
DFmáx1	4	0,247119

Test de Kolmogorov-Smirnov:

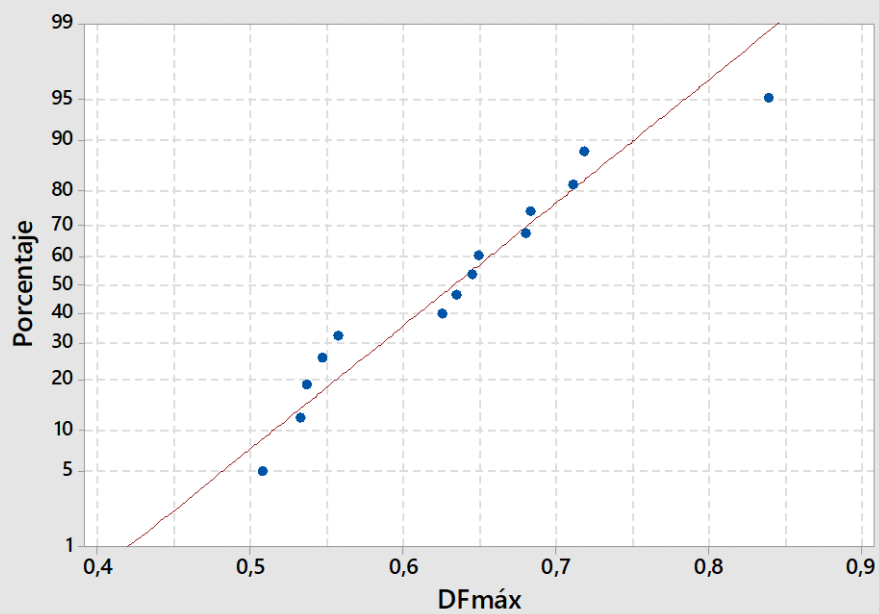


Gráfica de probabilidad de RT
Normal



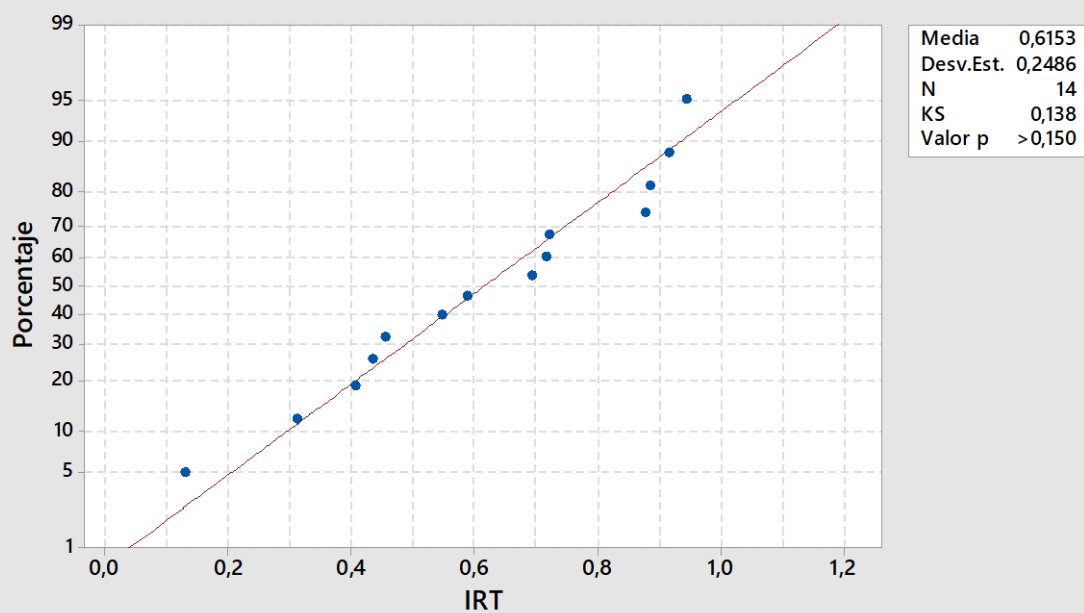
Media 0,1372
Desv.Est. 0,01327
N 14
KS 0,192
Valor p >0,150

Gráfica de probabilidad de DFmáx
Normal

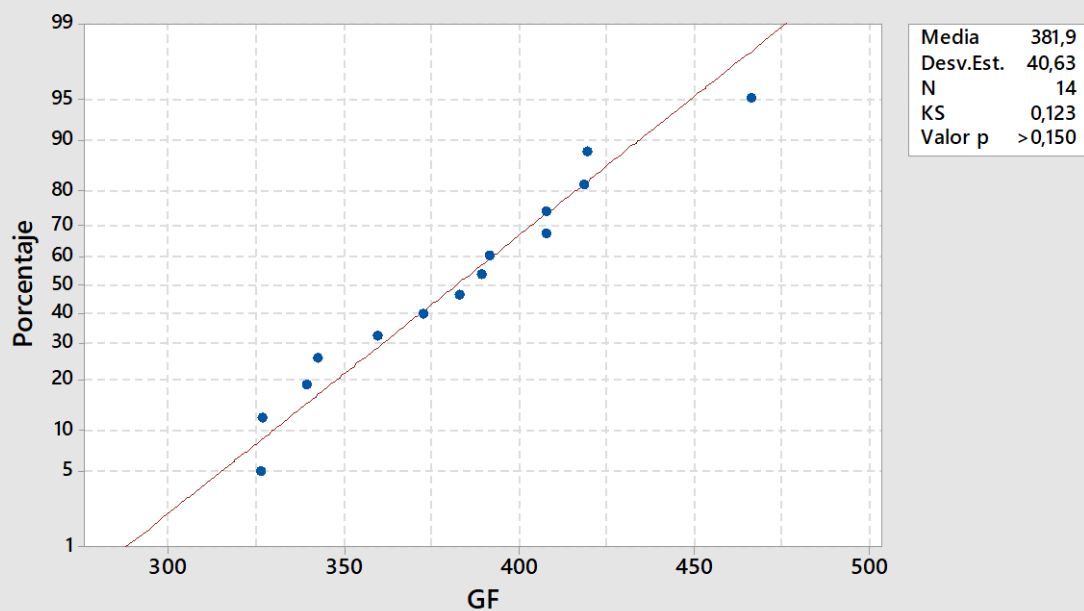


Media 0,6327
Desv.Est. 0,09175
N 14
KS 0,154
Valor p >0,150

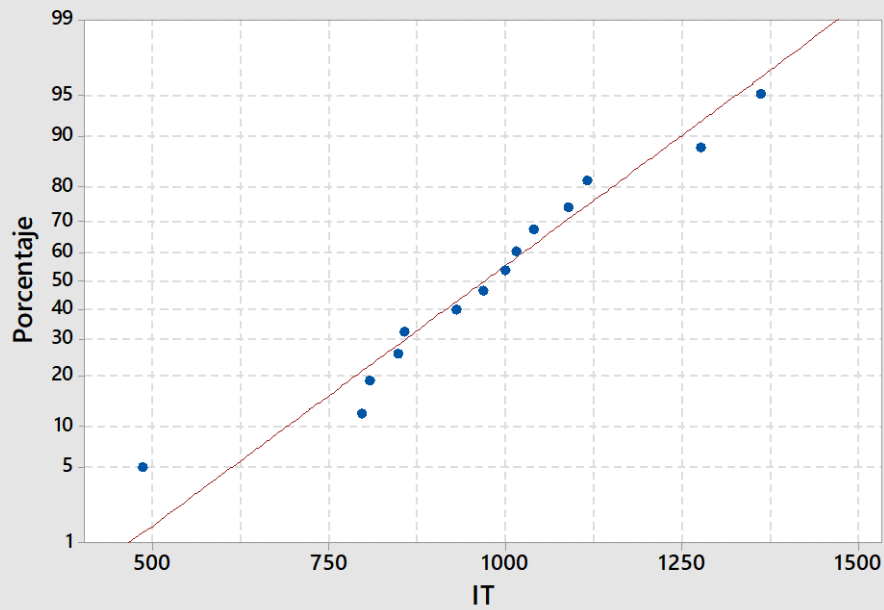
Gráfica de probabilidad de IRT
Normal



Gráfica de probabilidad de GF
Normal

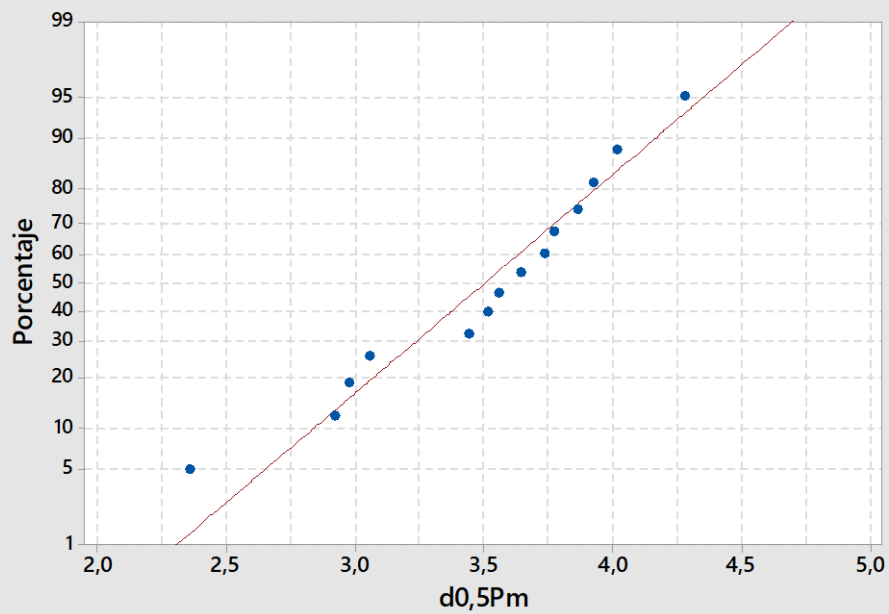


Gráfica de probabilidad de IT
Normal



Media	969,1
Desv.Est.	216,8
N	14
KS	0,138
Valor p	>0,150

Gráfica de probabilidad de d0,5Pm
Normal



Media	3,501
Desv.Est.	0,5152
N	14
KS	0,165
Valor p	>0,150

5.5 % de contenido de betún a 5 °C

Test de Grubbs':

Prueba de valores atípicos: %H; Fmáx; RT; DFmáx; IRT; GF; IT; d0,5Pm

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H	16	15,599	0,702	14,115	17,033	2,12	0,365
Fmáx	16	1,2782	0,1138	0,9552	1,4522	2,84	0,011
RT	16	0,6277	0,0588	0,4609	0,7110	2,84	0,011
DFmáx	16	0,31735	0,03496	0,23945	0,37157	2,23	0,244
IRT	16	3,341	0,712	1,216	3,977	2,99	0,004
GF	16	916,4	65,4	788,1	1023,1	1,96	0,602
IT	16	678,2	120,9	467,5	902,0	1,85	0,832
d0,5Pm	16	1,1332	0,1343	0,8931	1,3816	1,85	0,835

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
Fmáx	13	0,95524
RT	13	0,46092
IRT	13	1,21629

Gráfica de valores atípicos de %H

Gráfica de valores atípicos de Fmáx

Gráfica de valores atípicos de RT

Gráfica de valores atípicos de DFmáx

Gráfica de valores atípicos de IRT

Gráfica de valores atípicos de GF

Gráfica de valores atípicos de IT

Gráfica de valores atípicos de d0,5Pm

Prueba de valores atípicos: %H1; Fmáx1; RT1; DFmáx1; ... 1; IT1; d0,5Pm1

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H1	15	15,608	0,725	14,115	17,033	2,06	0,398
Fmáx1	15	1,2998	0,0770	1,1658	1,4522	1,98	0,518
RT1	15	0,6388	0,0398	0,5686	0,7110	1,81	0,849
DFmáx1	15	0,31533	0,03521	0,23945	0,37157	2,16	0,285
IRT1	15	3,482	0,446	2,312	3,977	2,63	0,032
GF1	15	925,0	57,7	842,1	1023,1	1,70	1,000
IT1	15	674,6	124,2	467,5	902,0	1,83	0,811

d0,5Pm1 15 1,1166 0,1210 0,8931 1,3339 1,85 0,773

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
----------	------	---------------

IRT1 13 2,31174

[Gráfica de valores atípicos de %H1](#)

[Gráfica de valores atípicos de Fmáx1](#)

[Gráfica de valores atípicos de RT1](#)

[Gráfica de valores atípicos de DFmáx1](#)

[Gráfica de valores atípicos de IRT1](#)

[Gráfica de valores atípicos de GF1](#)

[Gráfica de valores atípicos de IT1](#)

[Gráfica de valores atípicos de d0,5Pm1](#)

Prueba de valores atípicos: %H2; Fmáx2; RT2; DFmáx2; ... IT2; d0,5Pm2

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H2	14	15,583	0,745	14,115	17,033	1,97	0,483
Fmáx2	14	1,3093	0,0701	1,1689	1,4522	2,04	0,382
RT2	14	0,64372	0,03626	0,56861	0,71098	2,07	0,342
DFmáx2	14	0,31467	0,03644	0,23945	0,37157	2,06	0,351
IRT2	14	3,5660	0,3180	2,7101	3,9766	2,69	0,016
GF2	14	926,5	59,6	842,1	1023,1	1,62	1,000
IT2	14	665,8	124,0	467,5	902,0	1,91	0,592
d0,5Pm2	14	1,1038	0,1146	0,8931	1,3339	2,01	0,427

Valor atípico

Variable	Fila	Valor atípico
----------	------	---------------

IRT2 4 2,71007

[Gráfica de valores atípicos de %H2](#)

[Gráfica de valores atípicos de Fmáx2](#)

[Gráfica de valores atípicos de RT2](#)

[Gráfica de valores atípicos de DFmáx2](#)

[Gráfica de valores atípicos de IRT2](#)

[Gráfica de valores atípicos de GF2](#)

[Gráfica de valores atípicos de IT2](#)

[Gráfica de valores atípicos de d0,5Pm2](#)

Prueba de valores atípicos: %H3; Fmáx3; RT3; DFmáx3; ... IT3; d0,5Pm3

Método

Hipótesis nula Todos los valores de los datos provienen de la misma población normal

Hipótesis alterna El valor más pequeño o más grande de los datos es un valor atípico

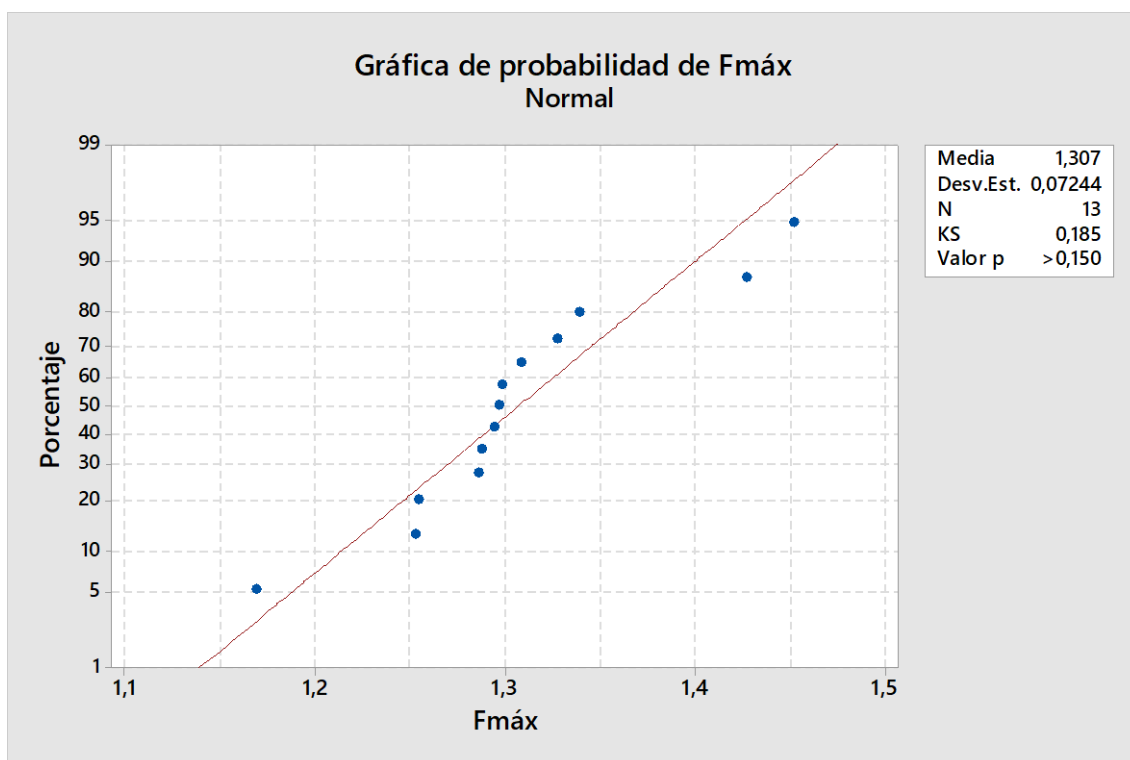
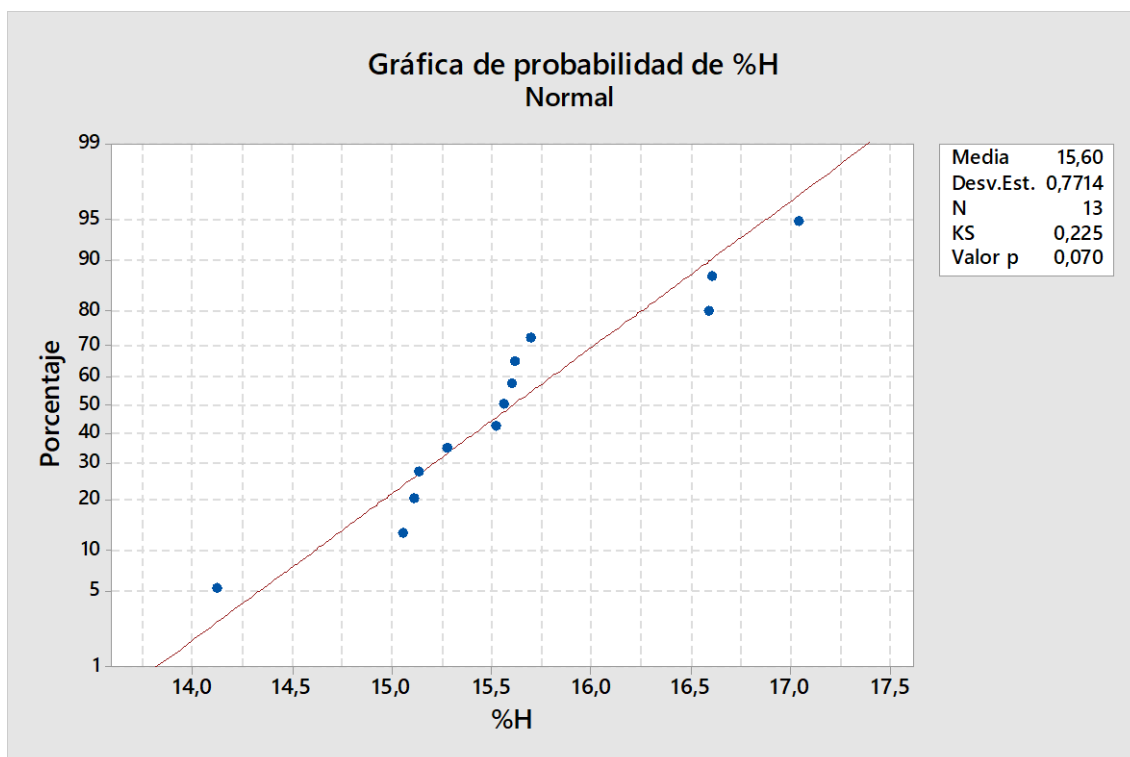
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Prueba de Grubbs

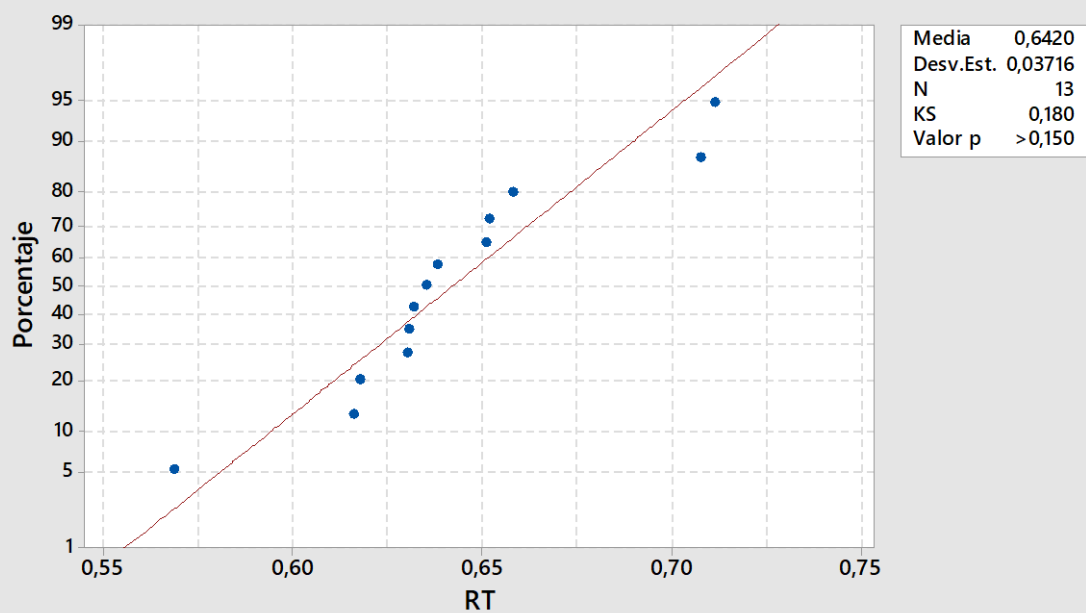
Variable	N	Media	Desv.Est.	Mín.	Máx.	G	P
%H3	13	15,604	0,771	14,115	17,033	1,93	0,489
Fmáx3	13	1,3072	0,0724	1,1689	1,4522	2,00	0,384
RT3	13	0,6420	0,0372	0,5686	0,7110	1,98	0,422
DFmáx3	13	0,3120	0,0365	0,2394	0,3716	1,99	0,405
IRT3	13	3,6318	0,2092	3,3337	3,9766	1,65	1,000
GF3	13	920,3	57,2	842,1	1023,1	1,80	0,738
IT3	13	654,4	121,2	467,5	902,0	2,04	0,334
d0,5Pm3	13	1,0922	0,1102	0,8931	1,3339	2,19	0,186

*** NOTA *** No hay valor atípico en el nivel de significancia de 5%

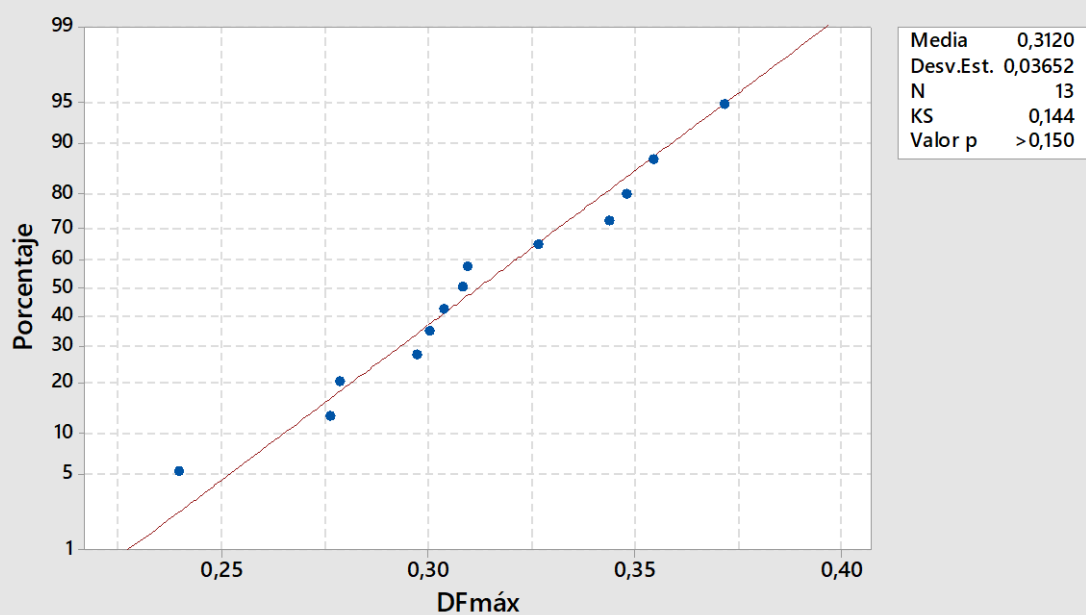
Test de Kolmogorov-Smirnov:



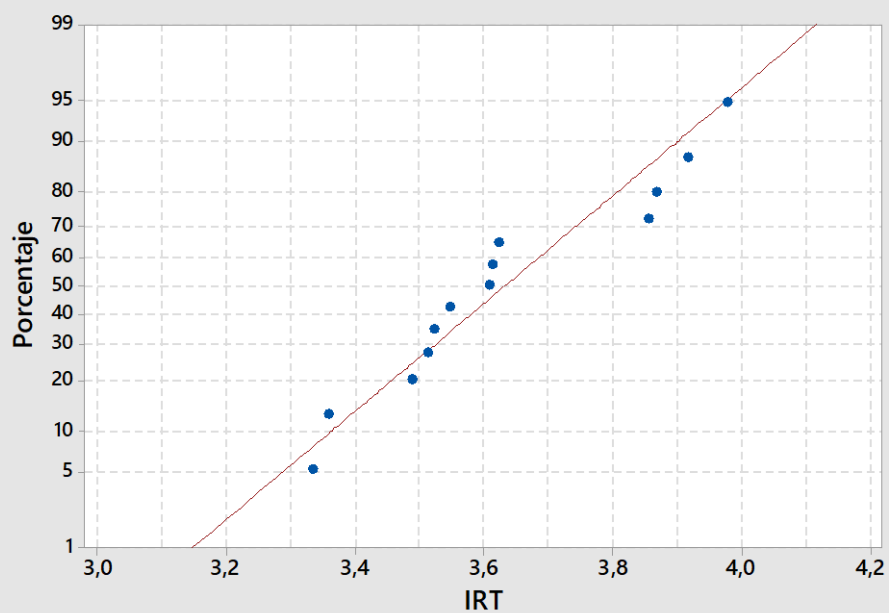
Gráfica de probabilidad de RT
Normal



Gráfica de probabilidad de DFmáx
Normal

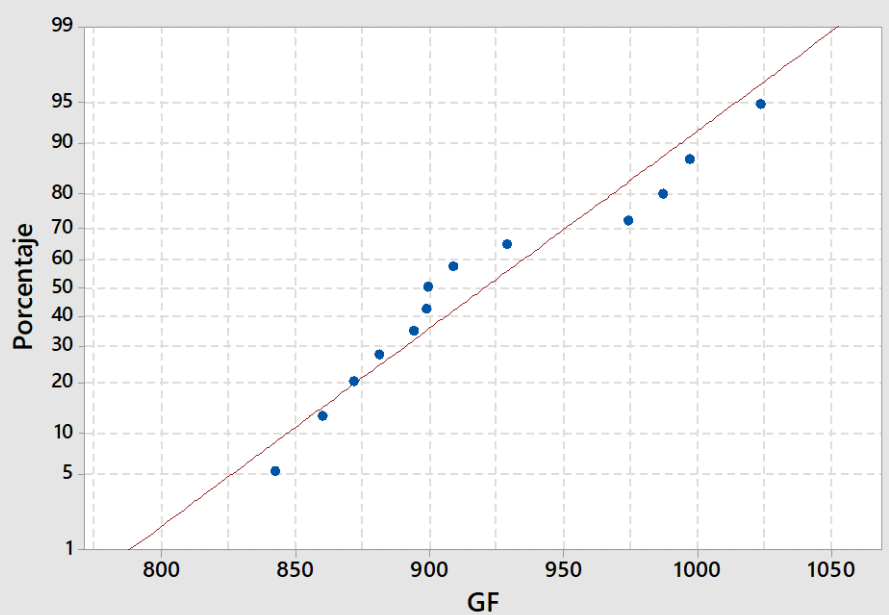


Gráfica de probabilidad de IRT
Normal



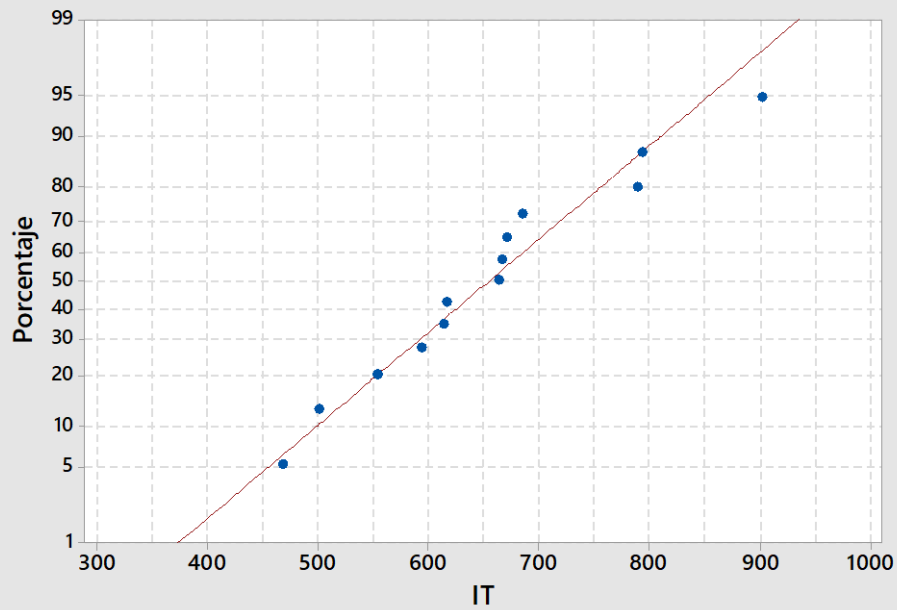
Media	3,632
Desv.Est.	0,2092
N	13
KS	0,210
Valor p	0,117

Gráfica de probabilidad de GF
Normal



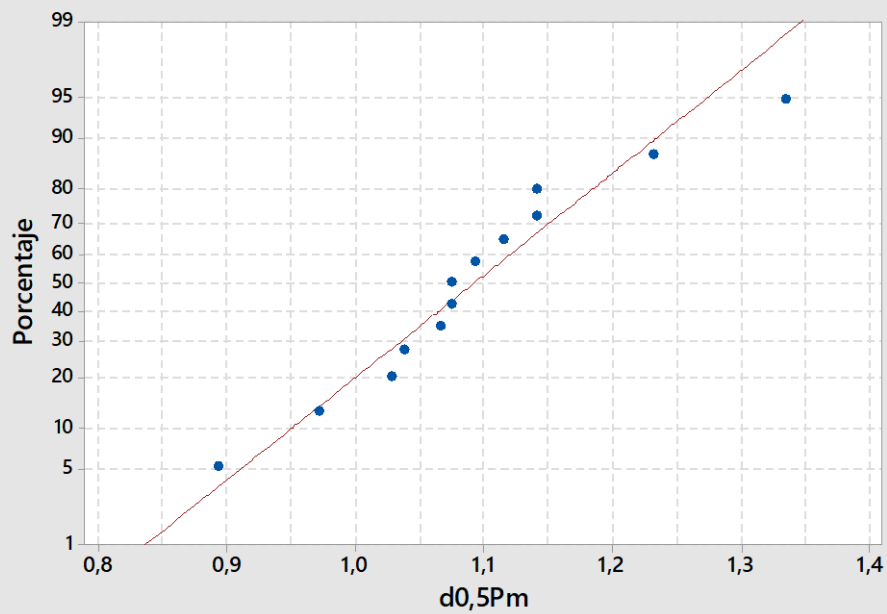
Media	920,3
Desv.Est.	57,16
N	13
KS	0,197
Valor p	>0,150

Gráfica de probabilidad de IT
Normal



Media	654,4
Desv.Est.	121,2
N	13
KS	0,171
Valor p	>0,150

Gráfica de probabilidad de d0,5Pm
Normal



Media	1,092
Desv.Est.	0,1102
N	13
KS	0,175
Valor p	>0,150

ANOVA

Parámetros de rigidez

Índice de rigidez a tracción (IRT)

➤ 20 °C

Prueba de igualdad de varianzas: IRT 4% 20°C; IRT 4,75% ... 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

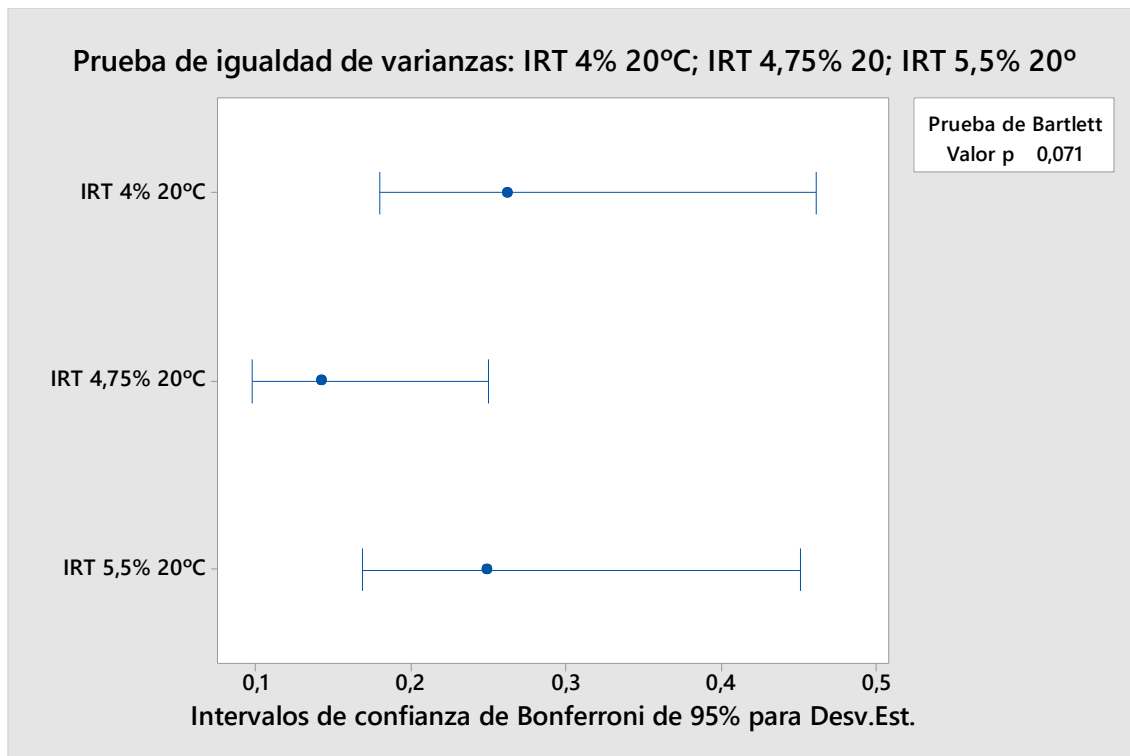
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT 4% 20°C	15	0,261253	(0,179303; 0,461017)
IRT 4,75% 20°C	15	0,141794	(0,097316; 0,250216)
IRT 5,5% 20°C	14	0,248613	(0,168631; 0,450769)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	5,28	0,071



ANOVA de un solo factor: IRT 4% 20°C; IRT 4,75% 20°C; IRT 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	IRT 4% 20°C; IRT 4,75% 20°C; IRT 5,5% 20°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0,5158	0,25790	5,18	0,010
Error	41	2,0405	0,04977		
Total	43	2,5563			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,223090	20,18%	16,28%	8,00%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
IRT 4% 20°C	15	0,5863	0,2613	(0,4699; 0,7026)
IRT 4,75% 20°C	15	0,8274	0,1418	(0,7110; 0,9437)
IRT 5,5% 20°C	14	0,6153	0,2486	(0,4949; 0,7358)

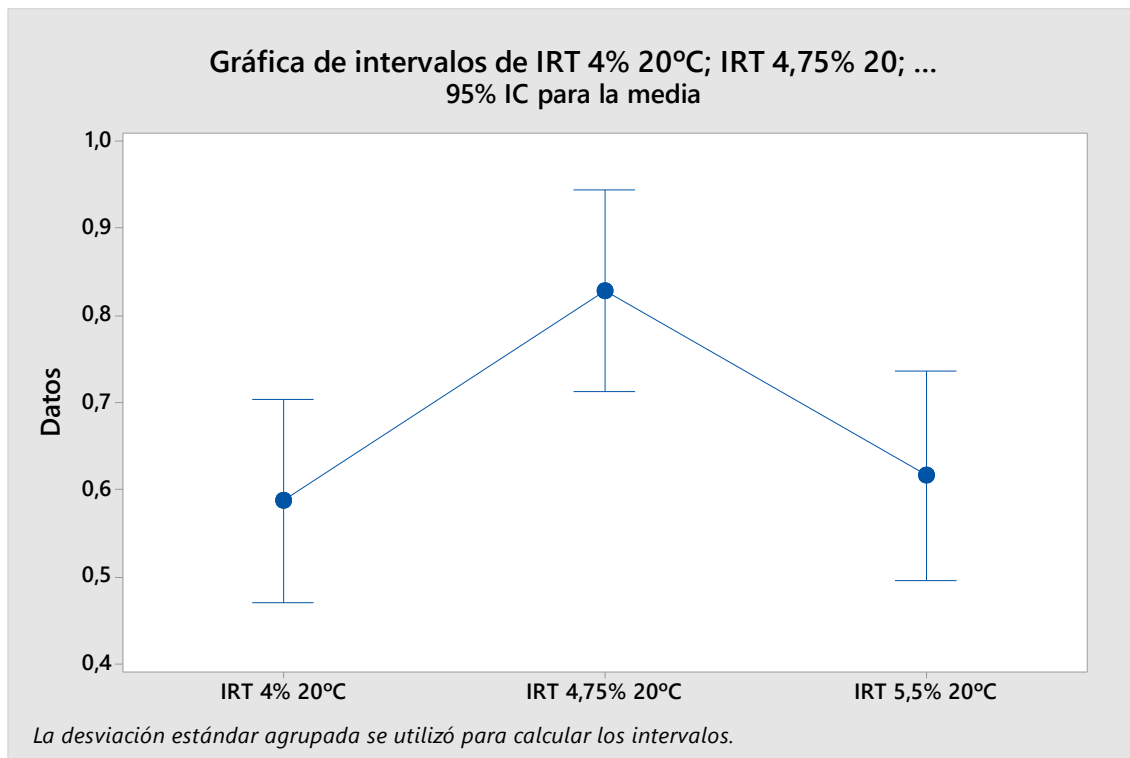
Desv.Est. agrupada = 0,223090

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
IRT 4,75% 20°C	15	0,8274	A
IRT 5,5% 20°C	14	0,6153	B
IRT 4% 20°C	15	0,5863	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



➤ 5 °C

Prueba de igualdad de varianzas: IRT 4% 5°C; IRT 4,75% ... T 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

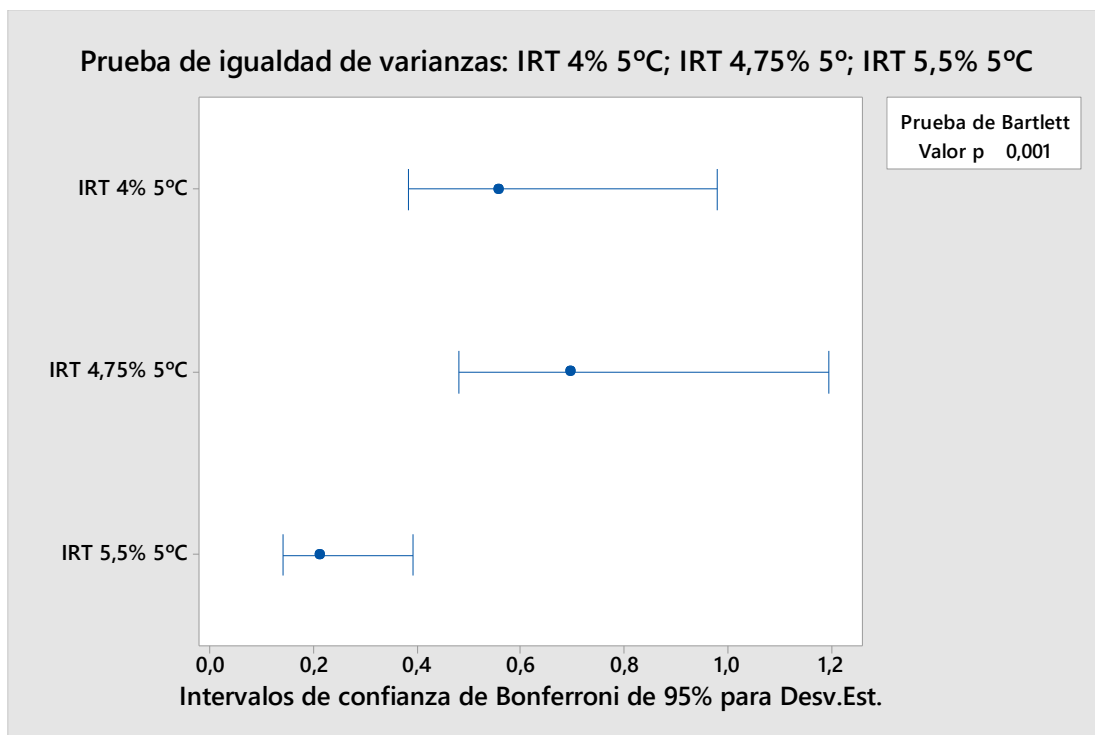
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IRT 4% 5°C	15	0,555451	(0,381216; 0,98017)
IRT 4,75% 5°C	16	0,693962	(0,481399; 1,19564)
IRT 5,5% 5°C	13	0,209246	(0,140091; 0,39136)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	14,35	0,001



ANOVA de un solo factor: IRT 4% 5°C; IRT 4,75% 5°C; IRT 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$
No se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	IRT 4% 5°C; IRT 4,75% 5°C; IRT 5,5% 5°C

Prueba de Welch

Fuente	GL		Valor F	Valor p
	Num	GL Den		
Factor	2	23,4654	4,33	0,025

Resumen del modelo

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
10,14%	5,75%	0,00%

Medias

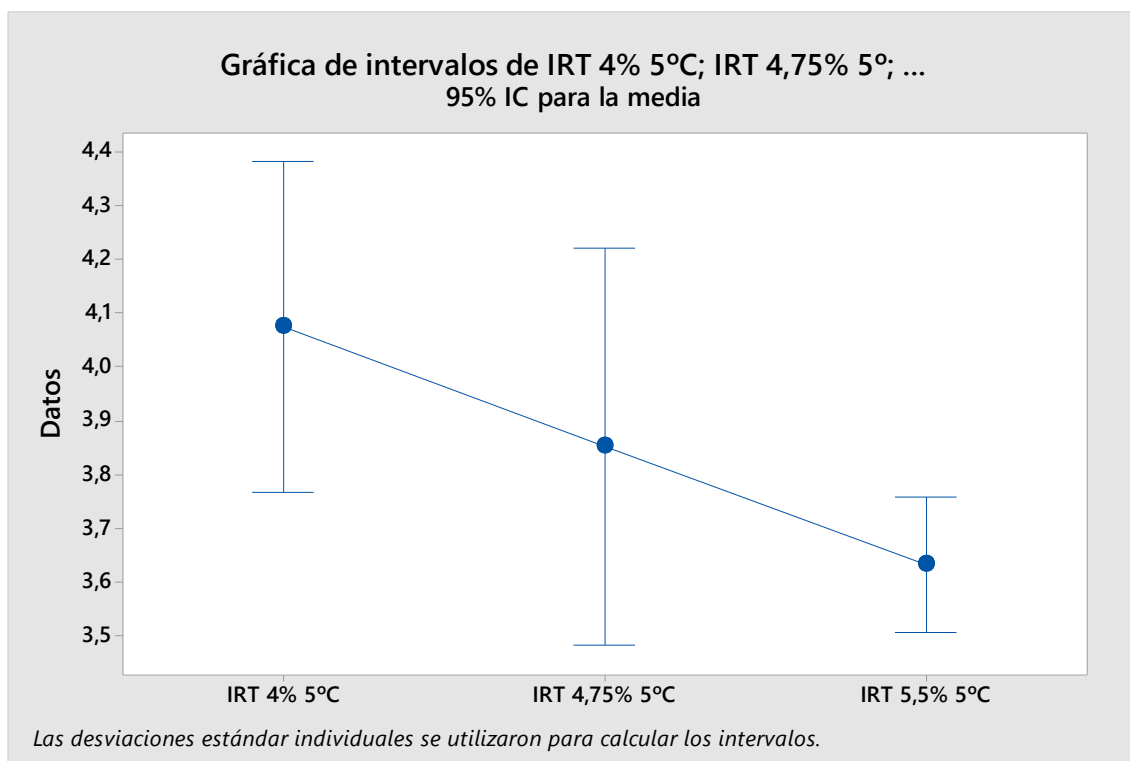
Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
IRT 4% 5°C	15	4,073	0,555	(3,766; 4,381)
IRT 4,75% 5°C	16	3,851	0,694	(3,482; 4,221)
IRT 5,5% 5°C	13	3,6318	0,2092	(3,5053; 3,7582)

Comparaciones en parejas de Games-Howell

Agrupar información utilizando el método de Games-Howell y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
IRT 4% 5°C	15	4,073	A
IRT 4,75% 5°C	16	3,851	A B
IRT 5,5% 5°C	13	3,6318	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



Energía de Fracturación (GF)

➤ 20 °C

Prueba de igualdad de varianzas: GF 4% 20°C; GF 4,75% ... 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

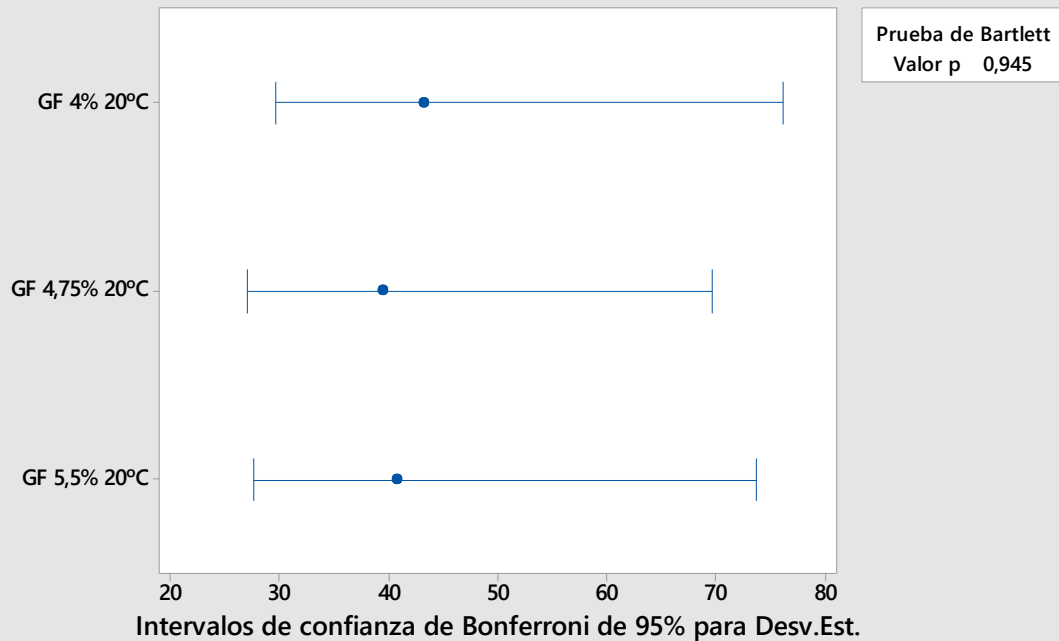
Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF 4% 20°C	15	43,1295	(29,6005; 76,1078)
GF 4,75% 20°C	15	39,4452	(27,0719; 69,6065)
GF 5,5% 20°C	14	40,6348	(27,5621; 73,6764)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	0,11	0,945

Prueba de igualdad de varianzas: GF 4% 20°C; GF 4,75% 20°C; GF 5,5% 20°C



ANOVA de un solo factor: GF 4% 20°C; GF 4,75% 20°C; GF 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	GF 4% 20°C; GF 4,75% 20°C; GF 5,5% 20°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	43045	21522	12,74	0,000
Error	41	69291	1690		
Total	43	112335			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
41,1098	38,32%	35,31%	28,97%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
GF 4% 20°C	15	309,6	43,1	(288,2; 331,1)
GF 4,75% 20°C	15	367,5	39,4	(346,1; 388,9)
GF 5,5% 20°C	14	381,9	40,6	(359,7; 404,1)

Desv.Est. agrupada = 41,1098

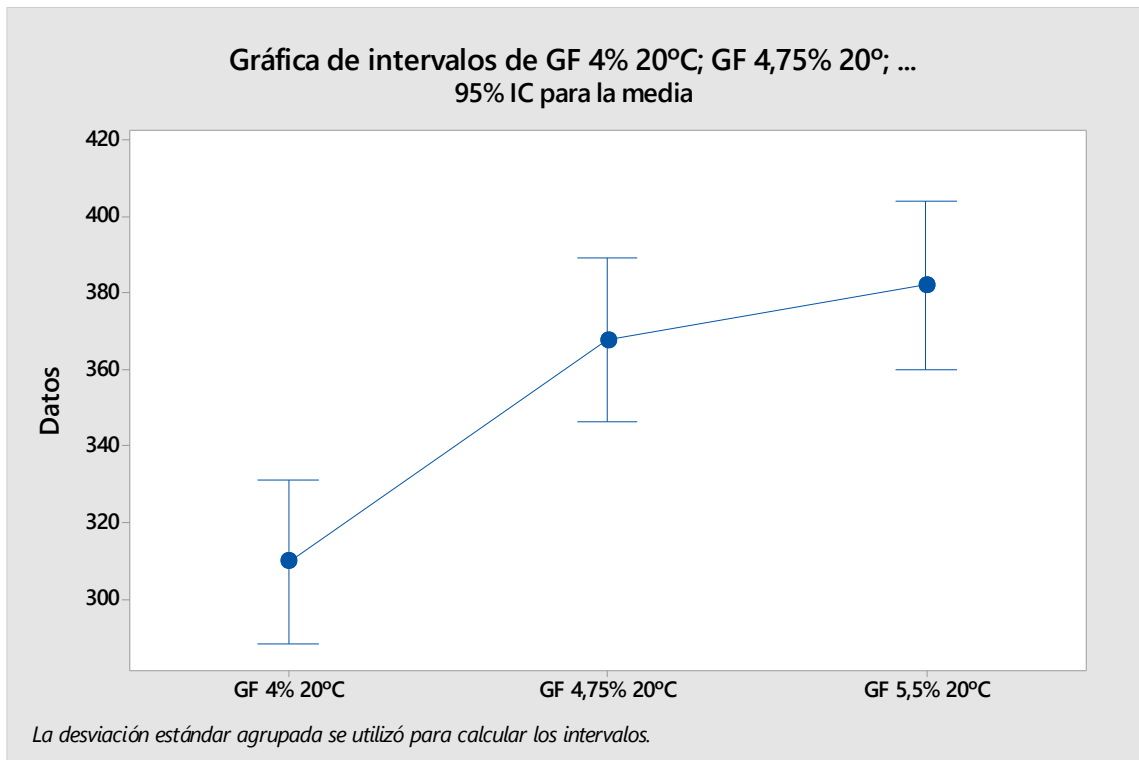
Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
GF 5,5% 20°C	14	381,9	A

GF 4,75% 20°C 15 367,5 A
GF 4% 20°C 15 309,6 B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



➤ **5 °C**

Prueba de igualdad de varianzas: GF 4% 5°C; GF 4,75% ... GF 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

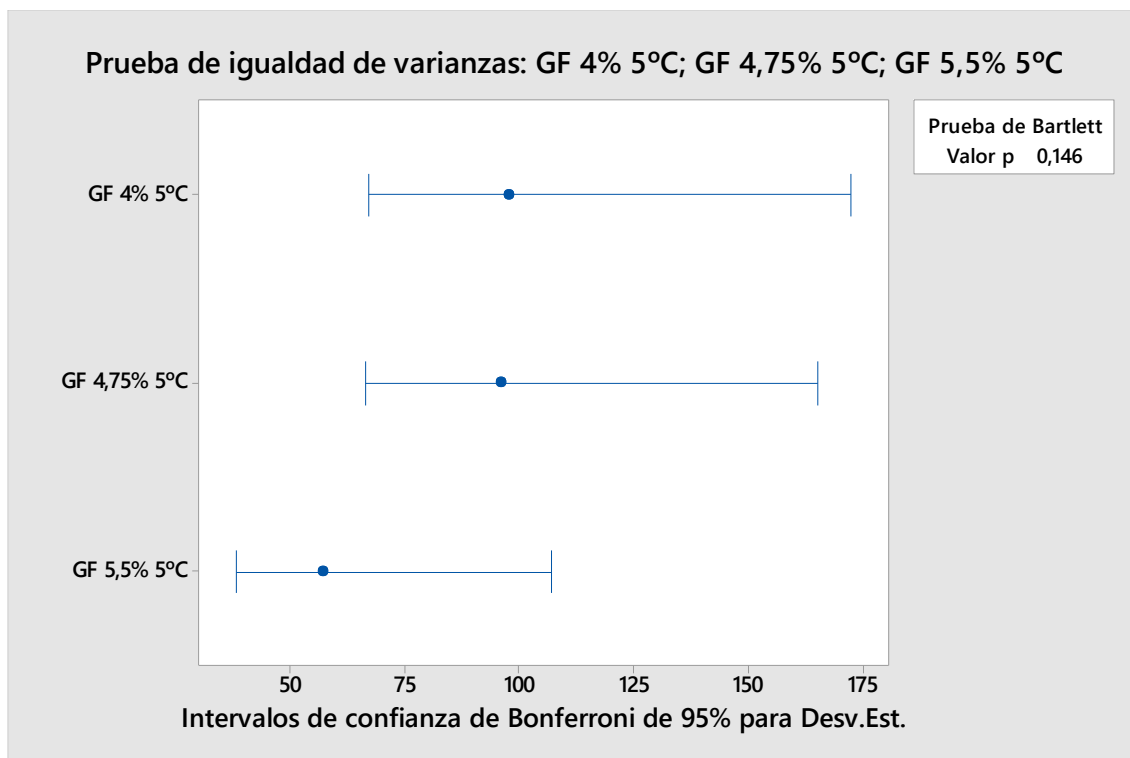
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
GF 4% 5°C	15	97,7084	(67,0590; 172,420)
GF 4,75% 5°C	16	95,8706	(66,5052; 165,177)
GF 5,5% 5°C	13	57,1594	(38,2684; 106,906)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	3,85	0,146



ANOVA de un solo factor: GF 4% 5°C; GF 4,75% 5°C; GF 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	GF 4% 5°C; GF 4,75% 5°C; GF 5,5% 5°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	670596	335298	44,24	0,000
Error	41	310731	7579		
Total	43	981327			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
87,0563	68,34%	66,79%	63,69%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
GF 4% 5°C	15	620,3	97,7	(574,9; 665,7)
GF 4,75% 5°C	16	694,0	95,9	(650,1; 738,0)
GF 5,5% 5°C	13	920,3	57,2	(871,6; 969,1)

Desv.Est. agrupada = 87,0563

Comparaciones en parejas de Tukey

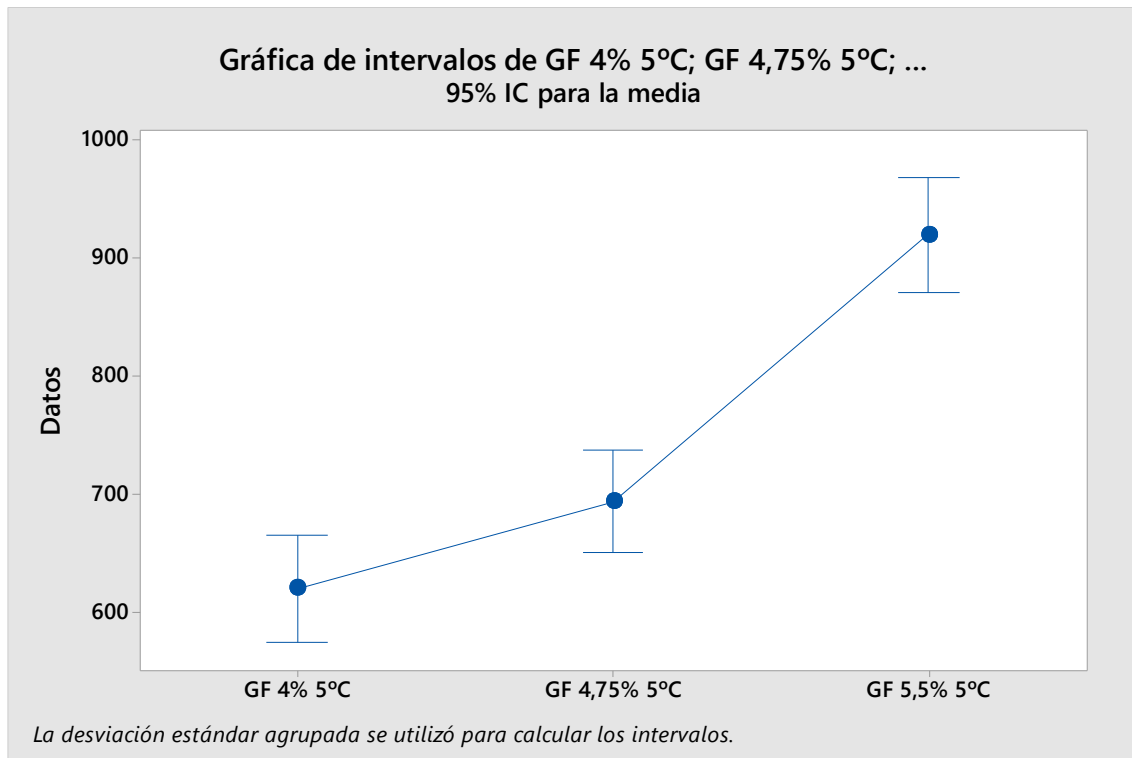
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
GF 5,5% 5°C	13	920,3	A

GF 4,75% 5°C 16 694,0 B

GF 4% 5°C 15 620,3 B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



Resistencia a Tracción (RT)

➤ 20 °C

Prueba de igualdad de varianzas: RT 4% 20°C; RT 4,75% ... 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

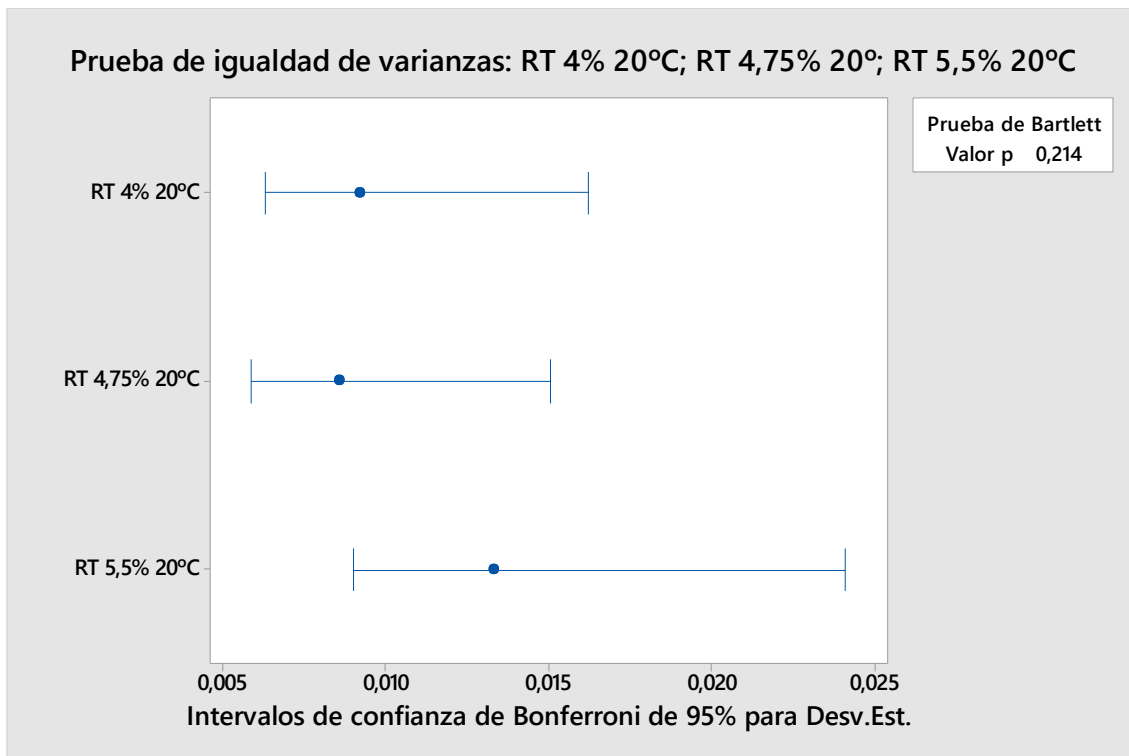
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
RT 4% 20°C	15	0,0091947	(0,0063104; 0,0162252)
RT 4,75% 20°C	15	0,0085344	(0,0058573; 0,0150601)
RT 5,5% 20°C	14	0,0132722	(0,0090024; 0,0240643)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	3,08	0,214



ANOVA de un solo factor: RT 4% 20°C; RT 4,75% 20°C; RT 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
Nivel de significancia $\alpha = 0,05$
Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	RT 4% 20°C; RT 4,75% 20°C; RT 5,5% 20°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0,002365	0,001183	10,79	0,000
Error	41	0,004493	0,000110		
Total	43	0,006859			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0104686	34,49%	31,29%	24,40%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
RT 4% 20°C	15	0,12599	0,00919	(0,12053; 0,13145)
RT 4,75% 20°C	15	0,14353	0,00853	(0,13807; 0,14899)
RT 5,5% 20°C	14	0,13723	0,01327	(0,13158; 0,14288)

Desv.Est. agrupada = 0,0104686

Comparaciones en parejas de Tukey

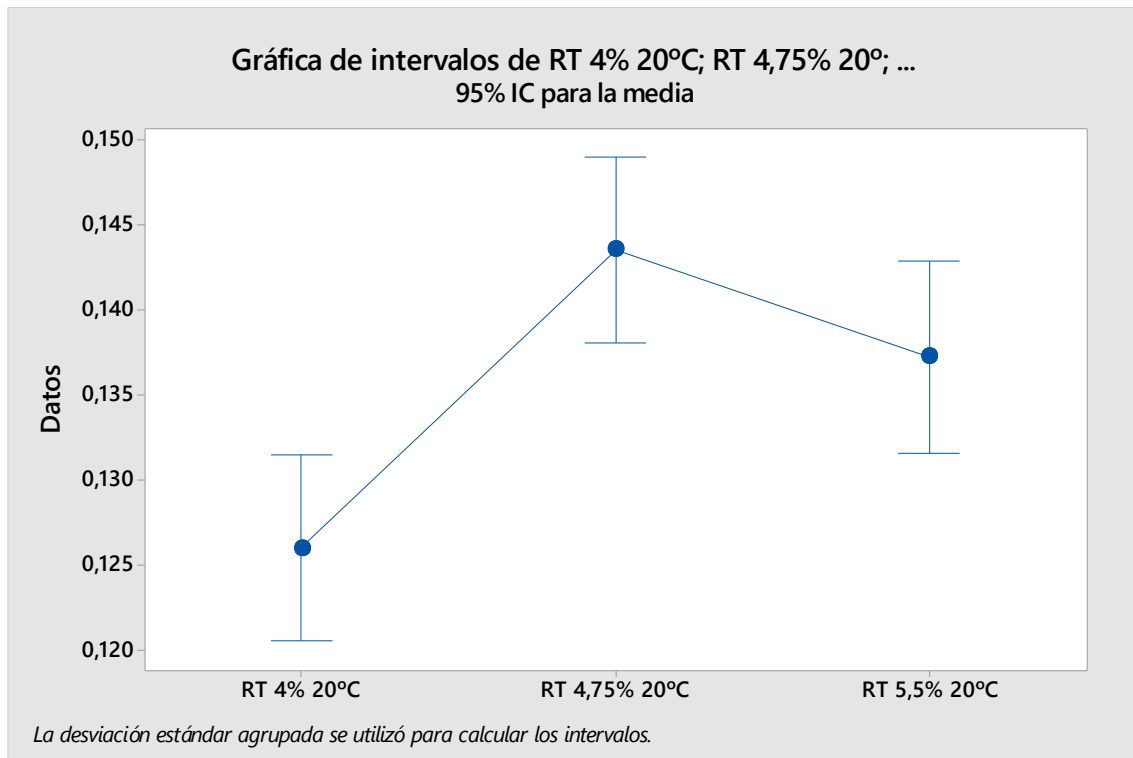
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
RT 4,75% 20°C	15	0,14353	A

RT 5,5% 20°C 14 0,13723 A

RT 4% 20°C 15 0,12599 B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



➤ 5 °C

Prueba de igualdad de varianzas: RT 4% 5°C; RT 4,75% ... RT 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

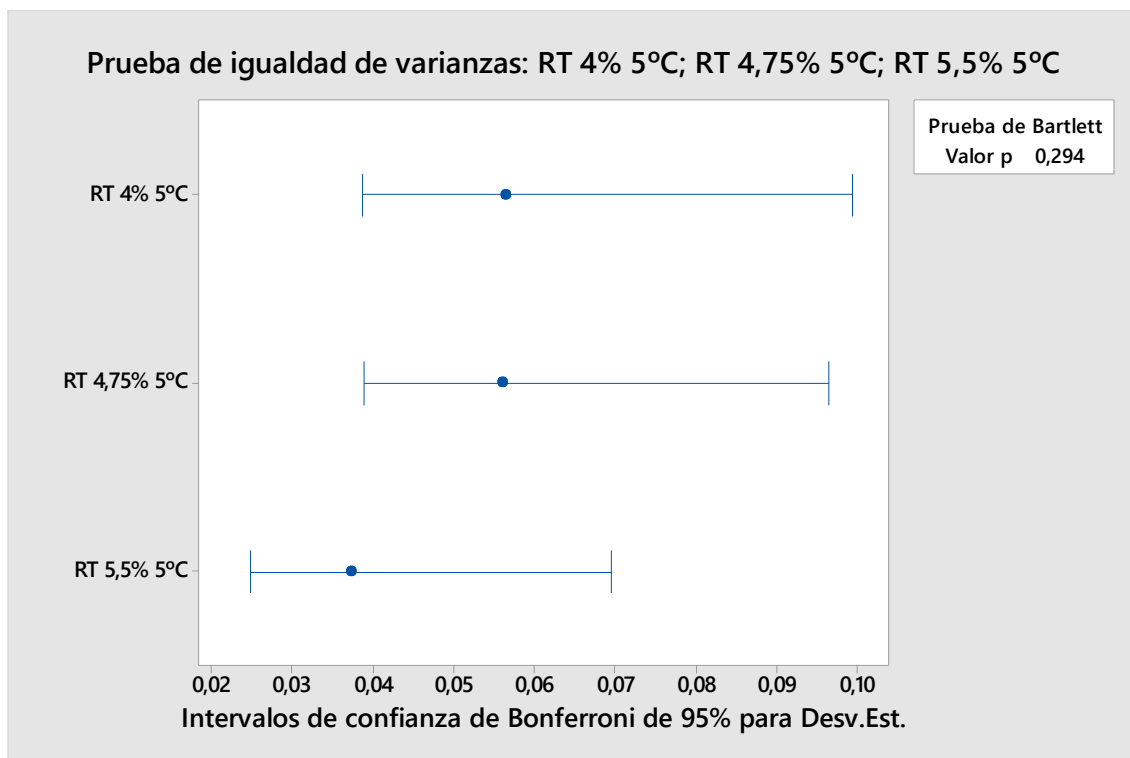
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
RT 4% 5°C	15	0,0562427	(0,0386004; 0,0992480)
RT 4,75% 5°C	16	0,0559710	(0,0388270; 0,0964334)
RT 5,5% 5°C	13	0,0371587	(0,0248778; 0,0694986)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	2,45	0,294



ANOVA de un solo factor: RT 4% 20°C; RT 4,75% 20°C; RT 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	RT 4% 20°C; RT 4,75% 20°C; RT 5,5% 20°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0,002365	0,001183	10,79	0,000
Error	41	0,004493	0,000110		
Total	43	0,006859			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,0104686	34,49%	31,29%	24,40%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
RT 4% 20°C	15	0,12599	0,00919	(0,12053; 0,13145)
RT 4,75% 20°C	15	0,14353	0,00853	(0,13807; 0,14899)
RT 5,5% 20°C	14	0,13723	0,01327	(0,13158; 0,14288)

Desv.Est. agrupada = 0,0104686

Comparaciones en parejas de Tukey

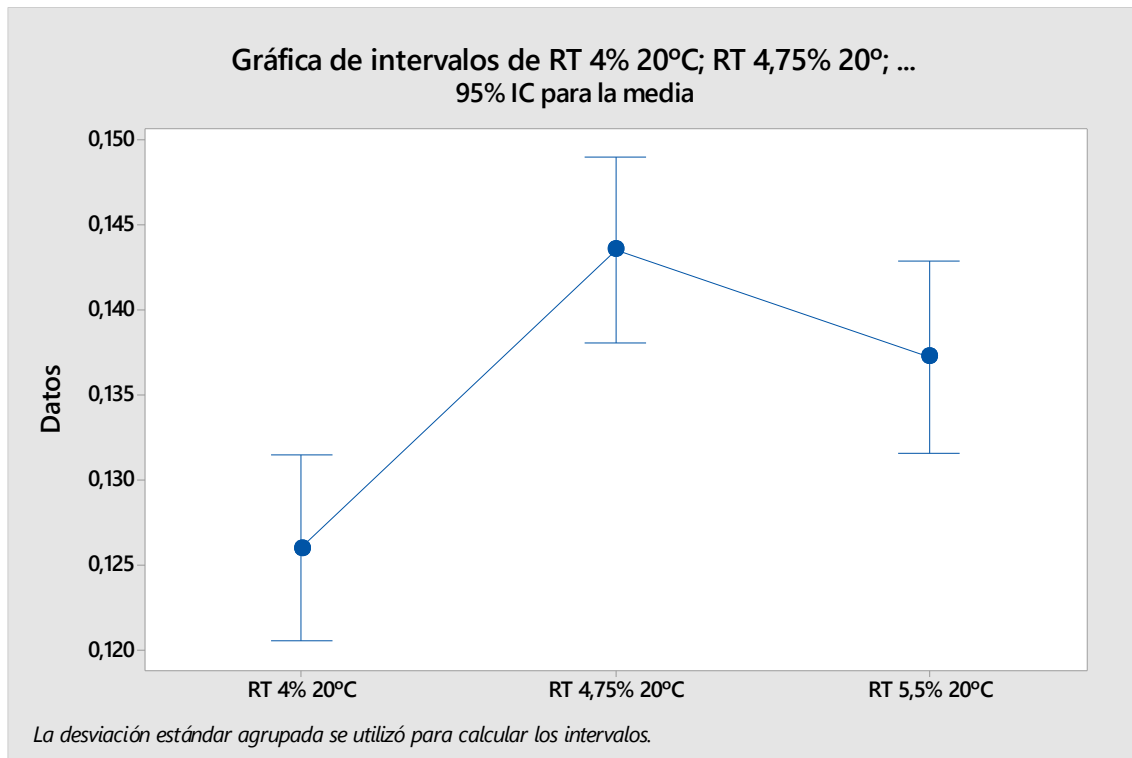
Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
RT 4,75% 20°C	15	0,14353	A

RT 5,5% 20°C 14 0,13723 A

RT 4% 20°C 15 0,12599 B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



Parámetros de rigidez

Índice de Tenacidad (IT)

➤ 20 °C

Prueba de igualdad de varianzas: IT 4% 20°C; IT 4,75% ... IT 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

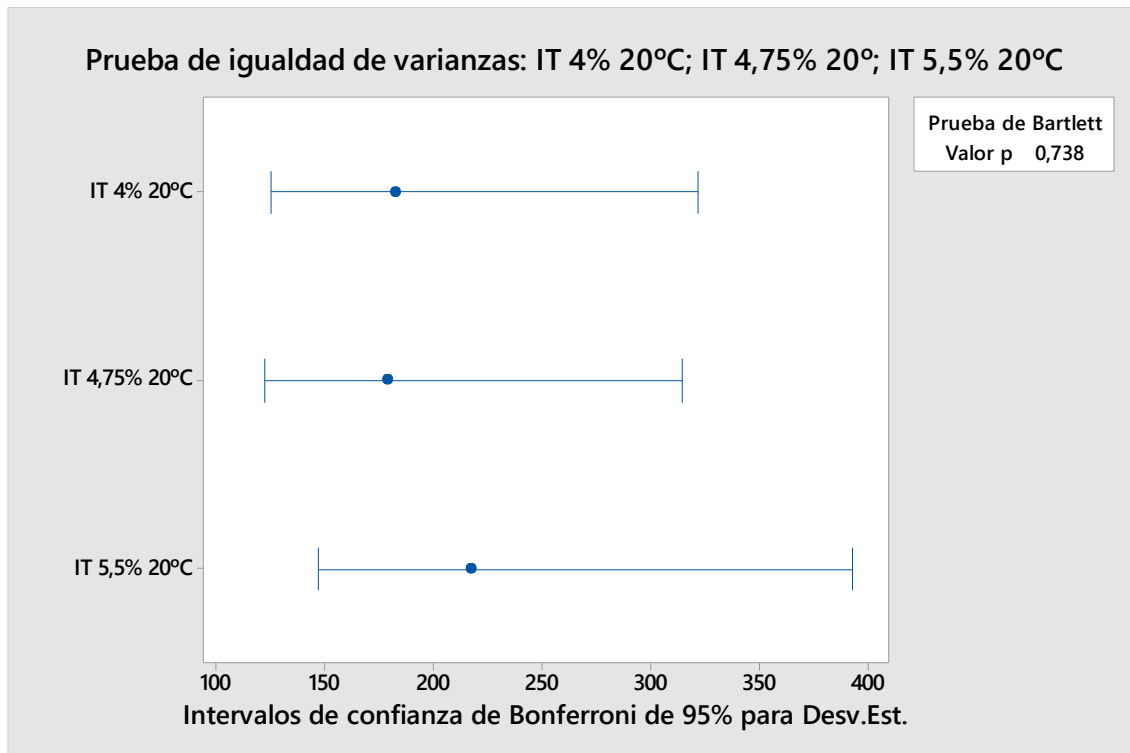
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
IT 4% 20°C	15	182,639	(125,348; 322,292)
IT 4,75% 20°C	15	178,458	(122,479; 314,914)
IT 5,5% 20°C	14	216,829	(147,072; 393,140)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	0,61	0,738



ANOVA de un solo factor: IT 4% 20°C; IT 4,75% 20°C; IT 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales
 Hipótesis alterna No todas las medias son iguales
 Nivel de significancia $\alpha = 0,05$
 Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	IT 4% 20°C; IT 4,75% 20°C; IT 5,5% 20°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	789091	394545	10,61	0,000
Error	41	1524053	37172		
Total	43	2313143			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
192,800	34,11%	30,90%	24,05%

Medias

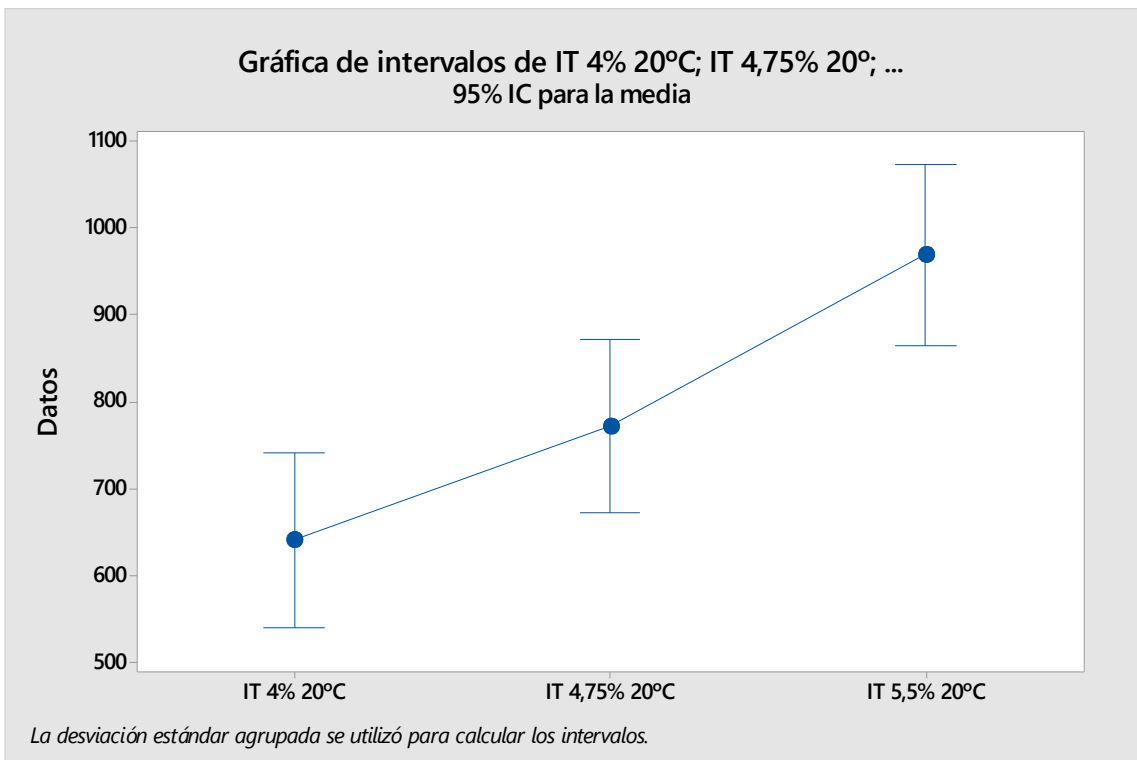
Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
IT 4% 20°C	15	640,5	182,6	(540,0; 741,1)
IT 4,75% 20°C	15	771,6	178,5	(671,1; 872,1)
IT 5,5% 20°C	14	969,1	216,8	(865,0; 1073,1)
Desv.Est. agrupada = 192,800				

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
IT 5,5% 20°C	14	969,1	A
IT 4,75% 20°C	15	771,6	B
IT 4% 20°C	15	640,5	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



Desplazamiento del 50% de la carga máxima (d0,5 Pm)

➤ 20 °C

Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm 4% 20°C; ... ,5Pm 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

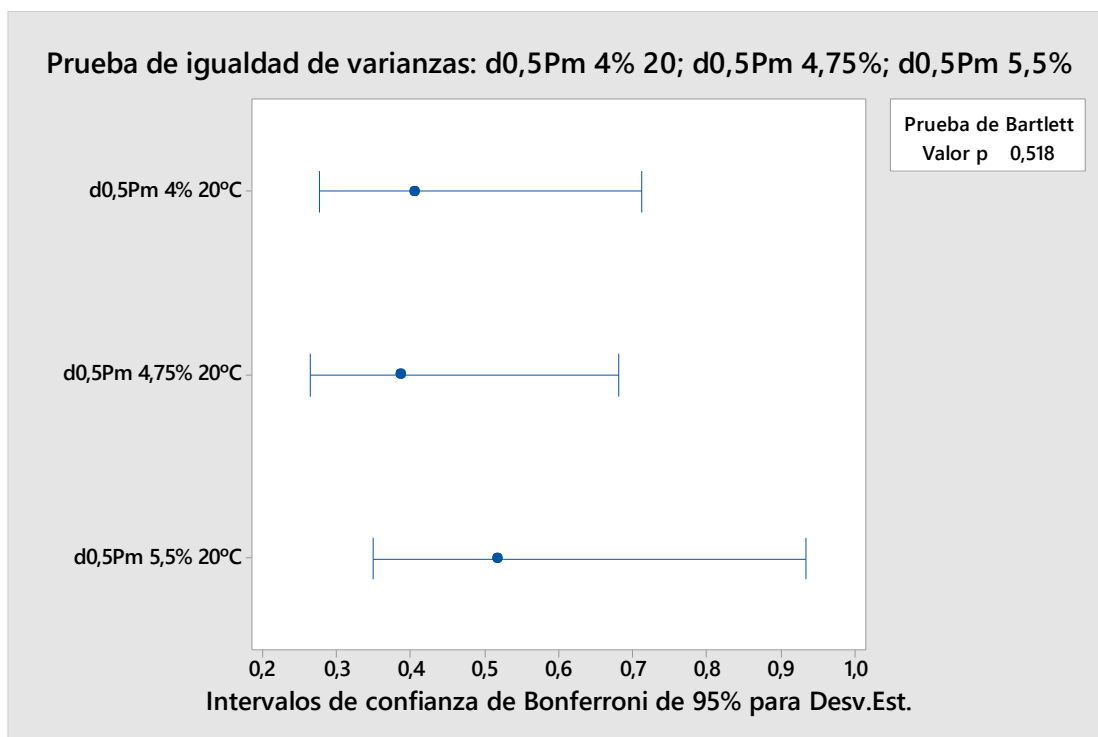
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm 4% 20°C	15	0,403284	(0,276781; 0,711650)
d0,5Pm 4,75% 20°C	15	0,385980	(0,264905; 0,681114)
d0,5Pm 5,5% 20°C	14	0,515210	(0,349461; 0,934146)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	1,32	0,518



ANOVA de un solo factor: d0,5Pm 4% 20°C; d0,5Pm ... 5Pm 5,5% 20°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	d0,5Pm 4% 20°C; d0,5Pm 4,75% 20°C; d0,5Pm 5,5% 20°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	4,149	2,0746	10,89	0,000
Error	41	7,813	0,1906		
Total	43	11,963			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,436544	34,68%	31,50%	24,68%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
d0,5Pm 4% 20°C	15	2,814	0,403	(2,586; 3,042)
d0,5Pm 4,75% 20°C	15	2,8747	0,3860	(2,6471; 3,1024)
d0,5Pm 5,5% 20°C	14	3,501	0,515	(3,266; 3,737)

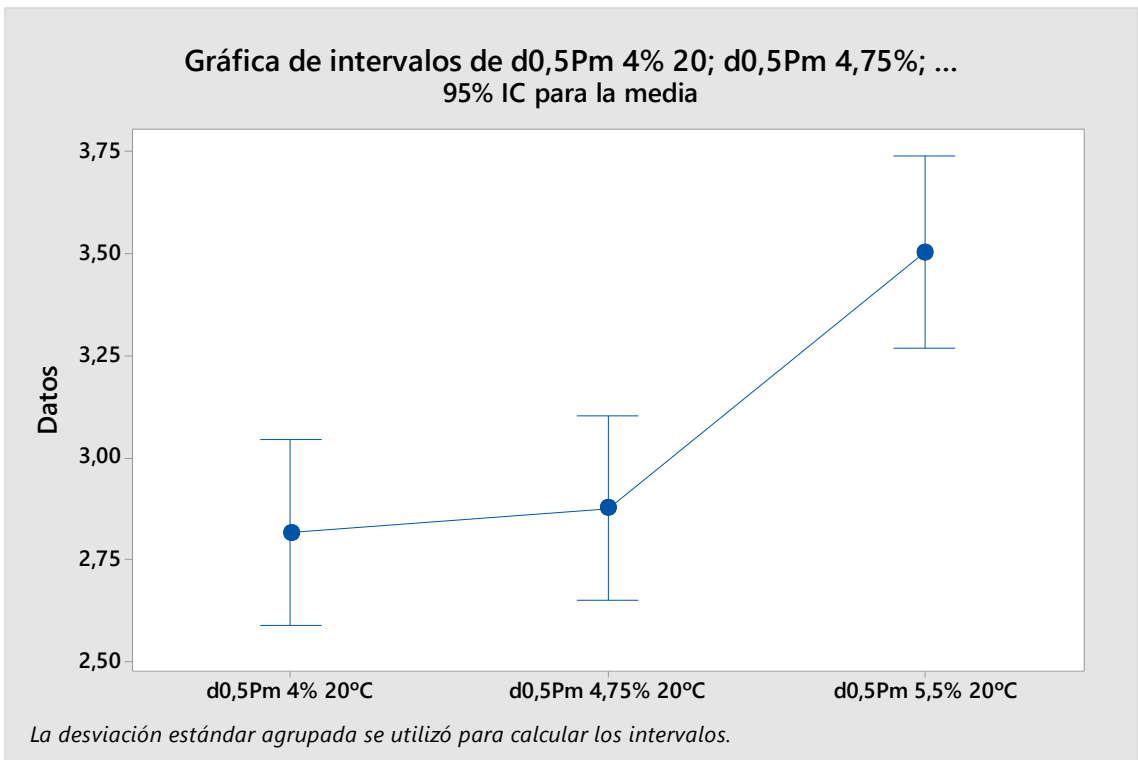
Desv.Est. agrupada = 0,436544

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
d0,5Pm 5,5% 20°C	14	3,501	A
d0,5Pm 4,75% 20°C	15	2,8747	B
d0,5Pm 4% 20°C	15	2,814	B

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.



➤ 5 °C

Prueba de igualdad de varianzas: d0,5Pm 4% 5°C; ... d0,5Pm 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las varianzas son iguales

Hipótesis alterna Por lo menos una varianza es diferente

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se utiliza el método de Bartlett. Este método es exacto sólo para datos normales.

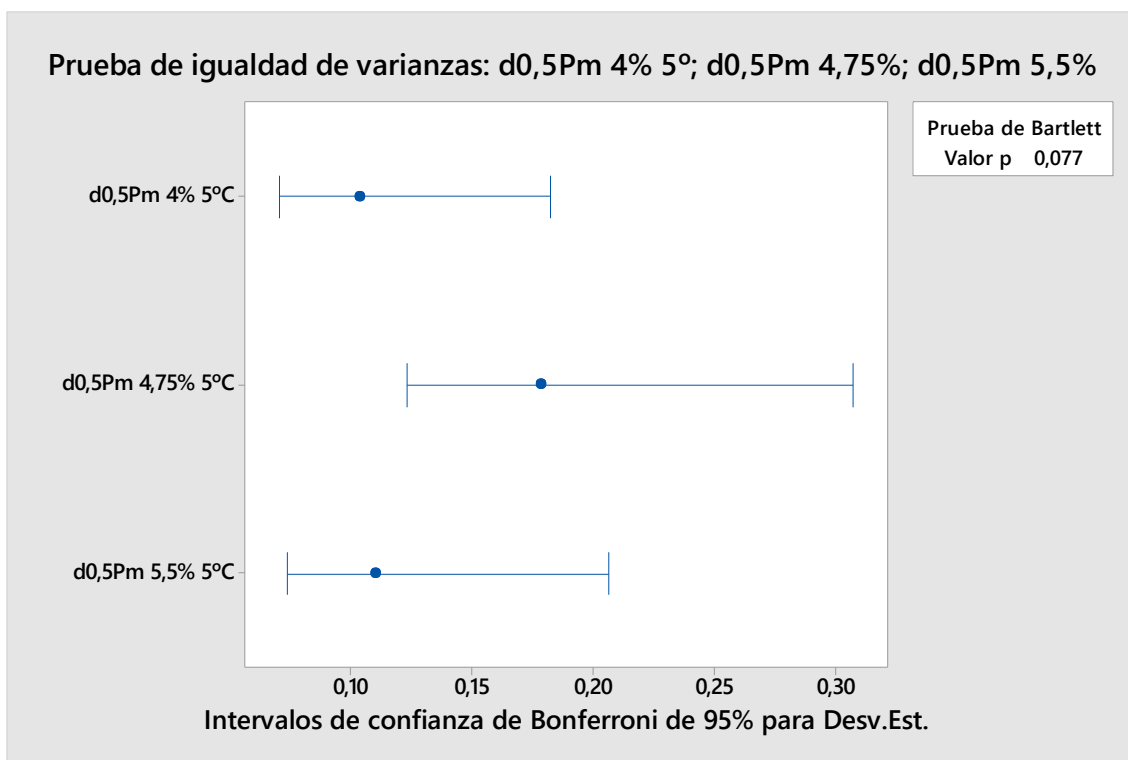
Intervalos de confianza de Bonferroni de 95% para desviaciones estándar

Muestra	N	Desv.Est.	IC
d0,5Pm 4% 5°C	15	0,103551	(0,071069; 0,182729)
d0,5Pm 4,75% 5°C	16	0,178133	(0,123570; 0,306908)
d0,5Pm 5,5% 5°C	13	0,110243	(0,073808; 0,206190)

Nivel de confianza individual = 98,3333%

Pruebas

Método	Estadística de prueba	Valor p
Bartlett	5,14	0,077



ANOVA de un solo factor: d0,5Pm 4% 5°C; d0,5Pm ... 0,5Pm 5,5% 5°C

Método

Hipótesis nula Todas las medias son iguales

Hipótesis alterna No todas las medias son iguales

Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Se presupuso igualdad de varianzas para el análisis.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Factor	3	d0,5Pm 4% 5°C; d0,5Pm 4,75% 5°C; d0,5Pm 5,5% 5°C

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	2	0,4947	0,24737	13,14	0,000
Error	41	0,7719	0,01883		
Total	43	1,2667			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,137214	39,06%	36,09%	30,13%

Medias

Factor	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
d0,5Pm 4% 5°C	15	0,8257	0,1036	(0,7542; 0,8973)
d0,5Pm 4,75% 5°C	16	0,9553	0,1781	(0,8860; 1,0246)
d0,5Pm 5,5% 5°C	13	1,0922	0,1102	(1,0153; 1,1690)

Desv.Est. agrupada = 0,137214

Comparaciones en parejas de Tukey

Agrupar información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%

Factor	N	Media	Agrupación
d0,5Pm 5,5% 5°C	13	1,0922	A
d0,5Pm 4,75% 5°C	16	0,9553	B
d0,5Pm 4% 5°C	15	0,8257	C

Las medias que no comparten una letra son significativamente diferentes.

